

Risco de Contaminação do Solo e das Plantas com Metais Pesados devido à Irrigação com Água Produzida na Extração de Petróleo



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agroindústria Tropical
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento***

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
183**

**Risco de Contaminação do Solo e das Plantas
com Metais Pesados devido à Irrigação com
Água Produzida na Extração de Petróleo**

Lindbergue Araújo Crisostomo
Olmar Baller Weber
Fábio Rodrigues de Miranda
Adervan Fernandes Sousa
Fernando Antonio Souza de Aragão

***Embrapa Agroindústria Tropical
Fortaleza, CE
2018***

Unidade responsável pelo conteúdo e edição:

Embrapa Agroindústria Tropical
Rua Dra. Sara Mesquita 2270, Pici
CEP 60511-110 Fortaleza, CE
Fone: (85) 3391-7100
Fax: (85) 3391-7109
www.embrapa.br/agroindustria-tropical
www.embrapa.br/fale-conosco

Comitê Local de Publicações
da Embrapa Agroindústria Tropical

Presidente
Gustavo Adolfo Saavedra Pinto

Secretária-executiva
Celli Rodrigues Muniz

Secretária-administrativa
Eveline de Castro Menezes

Membros
*Marlos Alves Bezerra, Ana Cristina Portugal
Pinto de Carvalho, Deborah dos Santos Garruti,
Dheyne Silva Melo, Ana Iraidy Santa Brígida,
Eliana Sousa Ximendes*

Supervisão editorial
Ana Elisa Galvão Sidrim

Revisão de texto
José Cesamildo Cruz Magalhães

Normalização bibliográfica
Rita de Cassia Costa Cid

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Ariilo Nobre de Oliveira

Foto da capa
Olmar Baller Weber

1ª edição
On-line (2018)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Agroindústria Tropical

Risco de contaminação do solo e das plantas com metais pesados devido à irrigação com
água produzida na extração de petróleo / Lindbergue Araújo Crisóstomo... [et al.]. –
Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2018.

24 p. ; 16 cm x 22 cm. – Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Agroindústria
Tropical, ISSN 1679-6543; 183).

Publicação disponibilizada on-line no formato PDF.

1. Águas de reuso. 2. Metais pesados. 3. salinização. I. Crisóstomo, Lindbergue Araújo.
II. Weber, Olmar Baller. III. Miranda, Fábio Rodrigues de. IV. Sousa, Adervan Fernandes.
V. Aragão, Fernando Anonio Souza de. VI. Série.

CDD 658.26

Sumário

Resumo4

Abstract6

Introdução.....7

Material e Métodos9

Resultados e Discussão13

Conclusões.....21

Agradecimentos.....21

Referências21

Risco de Contaminação do Solo e das Plantas com Metais Pesados devido à Irrigação com Água Produzida na Extração de Petróleo

Lindbergue Araújo Crisostomo¹

Olmar Baller Weber²

Fábio Rodrigues de Miranda³

Adervan Fernandes Sousa⁴

Fernando Antonio Souza de Aragão⁵

Resumo - O reuso da água produzida em campo petrolífero pode ser alternativa para irrigação de culturas não alimentares quando não há riscos de contaminação ambiental. Este trabalho teve por objetivo avaliar o aporte de metais pesados na produção das oleíferas girassol (*Helianthus annuus* L) e mamona (*Ricinus communis* L) e do abacaxizeiro ornamental (*Ananas comosus* var. *erectifolius*) irrigados com dois tipos de água produzida: filtrada (APF) e tratada por osmose reversa (APO) em comparação à água do subsolo, captada do aquífero Açú (ACA). As concentrações dos metais Ba, Cd, Co, Cr, Ni, Pb e Zn foram avaliadas no solo e nas plantas antes e após a irrigação por três ciclos de girassol, dois ciclos de mamona e um ciclo do abacaxizeiro. A irrigação continuada das culturas por cerca de um ano, independentemente da fonte hídrica, propiciou aumento nas concentrações de Ba, Cr, Ni, Pb e Zn do solo superficial, sendo os níveis ainda considerados toleráveis, segundo a Resolução Conama nº 420 e Cetesb 2005. Houve migração vertical dos metais Ba, Cr, Ni, Pb e Zn no perfil do solo, na seguinte ordem: ACA>APO>APF. As plantas cultivadas em áreas irrigadas com água

¹ Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia/Química Agrícola e Solos, pesquisador da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE

² Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia/Ciências do solo, pesquisador da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE

³ Engenheiro-agrônomo, doutor em Engenharia de Biosistemas, pesquisador da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE

⁴ Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia/Produção Vegetal, pesquisador da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE

⁵ Engenheiro-agrônomo, doutor em Ecologia e Recursos Naturais, professor da Universidade Estadual do Ceará (UECE/FAEC), Fortaleza, CE

produzida são capazes de absorver metais pesados. O abacaxizeiro ornamental absorve e acumula nas raízes Ba, Cd, Co, Cr, Ni, Pb e Zn; as plantas de girassol acumulam nas raízes Ba, Cd, Cr, Ni, Pb e Zn, e a mamoneira Ba, Pb e Zn. Portanto, recomenda-se o monitoramento de metais em águas residuais de campos de petróleo destinadas à irrigação de culturas agronômicas.

Palavras-chave: águas de reuso, metais pesados, salinização.

Risk of Contamination of Soil and Plants by Heavy Metals Due to Irrigation With Produced Water from Petroleum Extraction

Abstract - The reuse of produced water from oilfields can be an alternative for irrigation of non-food crops when there is no risk of environmental contamination. The objective of this work was to evaluate the concentration of heavy metals in soil and crops of sunflower (*Helianthus annuus* L) and castor bean (*Ricinus communis* L) and ornamental pineapples (*Ananas comosus* var. *erectifolius*), all of them irrigated with two types of produced water: one passed through sand filters (APF) and another treated by reverse osmosis (APO), along with a groundwater collected from the aquifer Açu (ACA). The concentrations of the metals Ba, Cd, Co, Cr, Ni, Pb and Zn were evaluated in soil and plants, after irrigation by three cycles of sunflower, two cycles of castor bean and one cycle of ornamental pineapple crops. The continuous irrigation of the crops for about one year, independent of the water source, increased Ba, Cr, Ni, Pb and Zn concentrations of the surface soil, but the levels were still tolerable by the 'Resolução Conama nº 420 e Cetesb 2005'. There was vertical migration of Ba, Cr, Ni, Pb and Zn metals in the soil, in the following order: ACA> APO> APF. Crops grown in areas subjected to irrigation with produced water were capable to absorb heavy metals. Ornamental pineapples absorb and accumulate Ba, Cd, Co, Cr, Ni, Pb and Zn in the roots. Sunflower plants accumulate Ba, Cd, Cr, Ni, Pb and Zn in the root system and castor bean plants accumulate Ba, Pb and Zn in root system. With these evidences, the authors suggest the monitoring of metals in produced water from oilfields and the soil-plant-system subjected to irrigation with such water.

Index terms: wastewater; heavy metals, salinization.

Introdução

A água é de extrema importância para as atividades do homem e seu uso merece destaque na produção de fibras e alimentos. Cerca de 70% da água doce consumida no planeta é destinada às atividades agrícolas, sendo que no Brasil essa proporção chega a 54%. Embora a agricultura irrigada represente apenas 20% da área total cultivada, ela é responsável por 40% da produção agrícola mundial (FAO, 2015).

O crescimento na demanda por água e alimentos tem por consequência a expansão de áreas produtivas e a necessidade do aperfeiçoamento de técnicas de cultivo irrigado. A limitação na disponibilidade de água doce em regiões produtivas de ambientes semiáridos requer mais esforços no sentido do uso eficiente de fontes alternativas de água em agrossistemas irrigados (Christofidis, 2002).

No cultivo de plantas cujos produtos não são consumidos diretamente pelo homem e na recarga de aquíferos subterrâneos, poderiam ser avaliadas as águas residuárias de campos de petróleo e gás. O uso de água residuária, independentemente da sua origem, deve ser incentivado (Mota et al., 2007, FAO, 2015). Arthur et al. (2005) e Xu et al. (2008) relataram que a água produzida, presente em fendas rochosas e que é extraída de poços de petróleo juntamente com o óleo, poderia ser usada em agrossistemas com pastagens.

O uso de águas oriundas da produção de óleo e de gás está estreitamente relacionado às questões ambientais, tendo em vista que uma utilização indevida oferece riscos de contaminação dos corpos hídricos (Goldemberg et al., 2014). A legislação brasileira (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2009) estabelece, para solo agrícola, os seguintes valores (mg kg^{-1}) para os metais Ba, Cd, Co, Cr, Ni, Pb e Zn, respectivamente: 300, 3, 35, 150, 70, 180 e 450), e para as águas subterrâneas os valores recomendados ($\mu\text{g L}^{-1}$) são: 700, 5, 70, 50, 20, 10 e 1050, respectivamente.

No sentido de remover os compostos orgânicos e minerais tóxicos, tem-se implantado, em unidades industriais de empresas petrolíferas, processos de filtração e purificação da água produzida (Motta et al., 2013; Oliveira, et al., 2014). Os procedimentos de purificação consistem em dessalinização,

remoção de sólidos, gases, partículas em suspensão, materiais orgânicos solúveis e materiais radioativos (Arthur et al., 2005; Xu et al., 2008; Igundu; Chen, 2014). A água produzida pode conter metais pesados, os quais podem afetar o crescimento e desenvolvimento de plantas, bem como comprometer a saúde do homem e dos animais.

Dere et al. (2006) reportaram que a irrigação massiva de um solo Luvisol arenoso culminou com o acúmulo de metais pesados, em que os elementos Pb e Cr ficaram retidos na camada superficial do solo, enquanto outros metais, como Ni, Cd, Cu e Zn, foram lixiviados para as camadas inferiores. Os autores atribuíram o acúmulo ou percolação desses metais às características físicas, químicas e físico-químicas do solo. Por sua vez, Singh et al. (2010) reportaram que a irrigação com águas residuárias oriundas de estação de esgoto, em Varanasi (Índia), durante duas décadas, propiciou o acúmulo de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn no solo e nas plantas. Resultados semelhantes foram relatados por outros pesquisadores (Khan et al., 2008; Ahmad; Goni, 2010; Mason et al., 2011), os quais demonstraram a necessidade do tratamento das águas residuárias, independentemente da origem.

As plantas absorvem os minerais do solo, inclusive os metais pesados. Tais metais podem ficar retidos nas raízes ou serem transportados pelos vasos do xilema para as partes aéreas das plantas (Rajkumar et al., 2012). De acordo com Kabata-Pendias et al. (2011), o acúmulo de metais ocorre na seguinte ordem de importância: raízes>ramos>folhas>frutos>sementes. Alguns metais, como Cu, Co e Zn, também exercem funções essenciais ao funcionamento dos processos bioquímicos das plantas. Já outros elementos, como Cd, Pb, As, Hg e Se, são prejudiciais ao metabolismo das plantas e de inúmeros outros componentes da biosfera.

A utilização da água produzida e tratada por filtração e osmose reversa sobre o crescimento e desenvolvimento de espécies vegetais não comestíveis, nas condições de solo e clima do semiárido nordestino, foram avaliadas por Crisostomo et al. (2016; 2018); Miranda et al. (2016); e Weber et al. (2017).

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da irrigação com água produzida sobre: 1) o acúmulo de metais pesados no solo e 2) absorção de metais pesados por plantas oleaginosas e ornamentais, tendo como controle a água captada no aquífero Açu, amplamente usada em agrossistemas irrigados na região do estudo.

Materiais e Métodos

Visando quantificar a presença de metais pesados no solo e nas plantas, experimentos com girassol oleífero (*Helianthus annuus* L), híbrido *BRS 321*, mamoneira (*Ricinus communis* L.), cultivar *BRS Energia*, e abacaxizeiro ornamental (*Ananas comosus* L variedade *erectifolius*) foram conduzidos na área experimental da Fazenda Belém, em Aracati, CE (coordenadas 4°44'46"S e 37°32'18"W), em solo Neossolo Quartzarênico Órtico, cujos atributos físicos, físico-químicos e químicos são encontrados nas Tabelas 1 e 1a.

Tabela 1. Atributos físicos do perfil (modal) do solo, Fazenda Belém, Aracati, Ceará.

Horizonte	Profundidade (cm)	Composição Granulométrica da Terra Fina			
		Areias	Silte	Argila total	Argila dispersa em água
		----- g kg ⁻¹ -----			
Ap	0-16	942,26	40,14	17,60	7,20
C1	16-66	945,26	32,34	22,40	10,60
C2	66-114	956,00	18,40	25,60	9,00
C3	114-182+	955,50	21,70	22,80	12,00

Tabela 1a. Atributos físico-químicos e químicos do perfil (modal) do solo, Fazenda Belém, Aracati, Ceará.

Hor.	pH _{1:2,5}		Complexo sortivo							V (%)
	Água	KCl _{1M}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H ⁺	T	
			----- cmol _c kg ⁻¹ -----							
Ap	6,27	5,91	1,60	1,60	0,08	0,11	0,10	1,50	4,99	67,93
C1	6,80	6,44	2,20	1,60	0,02	0,08	0,10	0,50	4,49	86,65
C2	7,17	6,58	1,20	2,20	0,02	0,14	0,10	0,50	4,16	85,58
C3	7,33	6,60	1,80	1,20	0,02	0,09	0,10	0,50	3,70	83,79

As condições climáticas na área experimental durante os períodos de cultivo foram relativamente uniformes, com temperatura máxima e mínima

do ar variando de $33,2 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ e mínima $22,7 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, respectivamente, e a umidade relativa do ar de $72,4 \pm 4,0\%$.

Os experimentos em campo consistiram de três tratamentos (águas de irrigação fornecidas pela Petrobras S.A.): água produzida filtrada e tratada por osmose reversa (APO); água somente filtrada (APF); e água subterrânea captada do Aquífero Açú (ACA). Os tratamentos foram distribuídos sob delineamento em blocos casualizados, com três repetições, em que foram testadas as culturas do abacaxi ornamental, da mamona e do girassol granífero.

Antes da implantação das culturas, foram quantificados os teores totais dos metais Ba, Cd, Co, Cr, Ni, Pb e Zn nas camadas 0-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade do solo (Tabela 2). A análise de variância dos resultados de cada elemento não revelou diferença significativa entre camadas de solo.

Tabela 2. Teores totais de metais pesados nas camadas do solo antes da implantação das culturas de mamona, girassol e abacaxizeiro, Fazenda Belém, Aracati, Ceará.

Profundidade (cm)	Ba	Cd	Co	Cr	Ni	Pb	Zn
	mg kg ⁻¹						
0 - 20	2,7a	0,2a	0,7a	2,0a	0,4a	2,4a	2,8a
20 - 40	2,1a	0,2a	0,8a	2,0a	0,4a	2,4a	1,9a
40 - 60	1,7a	0,2a	0,8a	2,2a	0,4a	2,6a	1,8a

Para o plantio das espécies vegetais, o preparo do solo consistiu, inicialmente, de aração, gradagem e abertura de sulcos com 0,15 m de profundidade, espaçados de 1,0 m. Na adubação de nivelamento, foram utilizados, por metro linear de sulco, 7,5 kg, 4,4 g, 40 g e 7 g de composto orgânico comercial (Pole Fértil, Integral Agro Industrial Ltda), ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio, os quais foram misturados com o solo do fundo do sulco. Considerando-se o período de 2012 a 2013, foi possível estabelecer diferentes ciclos de produção por cultura: três ciclos de girassol granífero, dois ciclos de mamona e um ciclo de abacaxizeiro ornamental. A adubação orgânica para o segundo ciclo de mamona e o segundo e terceiro ciclo de girassol oleífero foi reduzida para $2,5 \text{ kg m}^{-1}$ linear. Para as adubações de plantio e coberturas, foram seguidas as recomendações de Raij et al. (1997) para cada uma das culturas.

As plantas das três espécies foram irrigadas por gotejamento, utilizando-se uma linha de tubo gotejador por fileira, com emissores de vazão nominal de $1,0 \text{ L h}^{-1}$, espaçados de 0,3 m, com uniformidade de distribuição da água do sistema de irrigação de 92%. Dois dias antes dos plantios, foram aplicadas lâminas de água suficientes para umedecer o solo até cerca de um metro de profundidade. As irrigações foram automatizadas, aplicando-se lâminas correspondentes à evapotranspiração nos diferentes estádios das culturas, determinadas com base em lisímetros de coluna, instalados nos diferentes tratamentos de irrigação e fração de lixiviação de 0,1. As precipitações pluviais foram contabilizadas, as quais ocorreram principalmente nos períodos de entressafra.

Amostras de água de irrigação foram coletadas ao longo dos ciclos das culturas, sempre na entrada do campo experimental. Nas coletas (total de 17) foram usados frascos com capacidade para 150 mL, contendo 1 mL de ácido nítrico concentrado, mantidos sob refrigeração até as análises para a quantificação dos metais (Tabela 3). Para as análises físico-químicas das águas, outras amostras das águas foram coletadas em frascos de 1.000 mL, sendo igualmente mantidas sob refrigeração (Tabela 3).

Ao final dos ciclos de cultivo de cada espécie vegetal e no centro de dez diferentes bulbos molhados, foram coletadas, ao acaso, amostras do solo (compostas por 10 subamostras) nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, destinadas às avaliações químicas e físico-químicas. Igualmente, foram coletadas, ao acaso, dez plantas em cada parcela experimental, as quais foram separadas nas frações raiz e parte aérea. As sementes de girassol e de mamona também representaram uma fração. Todas as partes foram convenientemente lavadas, secas em estufa a 65°C , moídas e acondicionadas em frascos para análises químicas.

Das frações secas das plantas, 500 mg foram tomadas para a digestão em forno mufla, em temperatura de 500°C , por 4 horas. As cinzas foram solubilizadas em ácido nítrico ($1,0 \text{ mol L}^{-1}$), completando-se o volume para 50 mL (Silva, 2009). Das amostras de solo secas ao ar, 5 cm^3 foram macerados em gral de porcelana e passados por peneira com abertura de malha de 0,5 mm. Frações de 500 mg do solo macerado e peneirado foram transferidas para tubos de teflon, aos quais foram adicionados de 10 mL de ácido nítrico concentrado, seguida de digestão em forno micro-ondas

por 3, 10, e 15 minutos, em potências de 600, 800 e 0 W (Abreu et al., 2001). Para a quantificação dos elementos Ba, Cd, Co, Cr, Ni, Pb e Zn, foram estabelecidos os limites mínimos de detecção ($\mu\text{g L}^{-1}$) de 0,4; 0,8; 1,2; 2,5; 1,4; 4,9 e 0,5 considerados para o analisador ICP-OES (Perkin Elmer, modelo Optima 7300 DV), respectivamente. No cálculo final das concentrações de elementos, foram também considerados os metais exógenos aportados pelas águas de irrigação, bem como a sua migração no perfil do solo (Li et al., 2009), e o fator de transferência do solo para cada vegetal foi calculado segundo Cui et al. (2004).

Tabela 3. Concentração de alguns metais e constituintes químicos e físico-químicos das águas aplicadas nas culturas irrigadas de girassol oleífero, mamona e abacaxizeiro ornamental, na Fazenda Belém, em Aracati, Ceará.

Analito	Unidade	Água		
		ACA	APF	APO
pH	–	8,11 $\pm$ 0,18*	8,46 $\pm$ 0,29	7,56 $\pm$ 0,54
CE _a	dS m ⁻¹	0,69 $\pm$ 0,09	2,67 $\pm$ 0,59	0,53 $\pm$ 0,30
Ca ²⁺	mmol _c L ⁻¹	0,22 $\pm$ 0,02	0,16 $\pm$ 0,06	0,10 $\pm$ 0,10
Mg ²⁺	mmol _c L ⁻¹	0,12 $\pm$ 0,04	1,03 $\pm$ 1,53	0,29 $\pm$ 0,39
Na ⁺	mmol _c L ⁻¹	10,32 $\pm$ 6,12	18,48 $\pm$ 6,29	4,54 $\pm$ 2,77
K ⁺	mmol _c L ⁻¹	0,17 $\pm$ 0,18	0,70 $\pm$ 0,23	0,40 $\pm$ 0,33
Cl ⁻	mmol _c L ⁻¹	3,29 $\pm$ 0,71	17,7 $\pm$ 6,66	2,42 $\pm$ 1,61
CO ₃ ²⁻	mmol _c L ⁻¹	0,62 $\pm$ 0,24	1,43 $\pm$ 0,45	0,34 $\pm$ 0,40
HCO ₃ ⁻	mmol _c L ⁻¹	2,79 $\pm$ 0,37	3,51 $\pm$ 0,69	1,44 $\pm$ 1,18
Ba	$\mu\text{g L}^{-1}$	23,2 $\pm$ 14,1	178,9 $\pm$ 57,2	127,2 $\pm$ 18,9
Cd	$\mu\text{g L}^{-1}$	nd	nd	nd
Co	$\mu\text{g L}^{-1}$	nd	nd	nd
Cr	$\mu\text{g L}^{-1}$	nd	nd	nd
Ni	$\mu\text{g L}^{-1}$	2,5 $\pm$ 0,3	1,8 $\pm$ 0,1	2,2 $\pm$ 0,2
Pb	$\mu\text{g L}^{-1}$	5,9 $\pm$ 0,6	9,6 $\pm$ 2,5	6,3 $\pm$ 1,3
Zn	$\mu\text{g L}^{-1}$	23,0 $\pm$ 7,6	18,4 $\pm$ 9,6	4,0 $\pm$ 1,9

APO: água produzida tratada por osmose reversa; APF: água produzida filtrada; ACA: água captada do aquífero Açu. */ média (17 amostragens) $\pm$ desvio padrão; nd: não detectado.

Para as concentrações de metais no solo e na planta, os dados foram submetidos aos testes de pressuposição da análise de variância e, quando necessário, transformados pelo método de Box-Cox. Posteriormente foram submetidos à ANOVA, e as médias foram comparadas por meio do teste Tukey, a 5% de significância. Para migração dos metais nas camadas do solo e fator de transferência dos metais entre as partes das plantas, foi apresentada em estatística descritiva.

Resultados e Discussão

As águas aplicadas (Tabela 3) ao solo durante os períodos de cultivo propiciaram algumas modificações nas características físico-químicas e químicas em termos de pH, condutividade elétrica, bases trocáveis e relação de adsorção de sódio. Tais alterações influenciaram a solubilidade e mobilidade de alguns elementos na massa de solo, favorecendo o acúmulo na superfície ou a lixiviação para as camadas inferiores do perfil.

Em geral, as diferentes águas utilizadas na irrigação das culturas apresentaram concentrações de metais pesados avaliados inferiores àqueles sugeridos pela resolução (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2009) para as águas subterrâneas, os quais não comprometeriam o manejo dos agrossistemas. Alguns metais, como Cd, Co e Cr, não foram detectados pelo instrumental analítico utilizado, e outros, como Ni e Pb, ficaram próximas aos limites mínimos de detecção. As mais elevadas concentrações foram notadas para o Ba e Zn. As diferenças na composição química das águas produzidas (APO e APF) podem ser atribuídas aos processos de tratamento (filtração e osmose reversa para a APO e apenas filtração para a APF) e, ainda, à localização dos poços no campo petrolífero. A água subterrânea captada em diferentes poços com profundidades superiores a 250 m e oriunda do aquífero Açú também apresentou diferenças na concentração dos metais, exceto Cd, Co e Cr, no decorrer dos períodos de coleta, concordando, desse modo, com as observações de Braga Junior et al. (2017).

Ao final dos ciclos de produção, não foram observadas variações nas concentrações de Cd e Co nas camadas de solo. Isso era esperado, tendo em vista a não detecção de tais elementos nas águas de irrigação. Por outro

lado, o Cr, embora não detectado nas águas, teve seus valores no solo irrigado acrescidos em cerca de 2,5x em relação ao valor inicial e em todas as camadas do solo avaliadas. Segundo Pratt et al. (1988), o Cr é precipitado em meio alcalino, e isso parece não ter acontecido, pois, com a irrigação, foram observados incrementos substanciais no valor do pH e na concentração de Cr nas diferentes camadas do solo em relação ao período de pré-cultivo. Tais variações são atribuídas à lixiviação deste metal para as camadas de solo abaixo de 20 cm da superfície.

As concentrações de Ba, Ni, Pb e Zn no período pré-cultivo eram de baixos valores e sem diferenciação estatística entre as camadas de solo até 60 cm de profundidade.

Após os períodos de irrigação, metais como Ba e Zn apresentaram tendência de acumulação na camada superficial do solo (Tabelas 4, 5 e 6). Kabata-Pendias (2011) relatou que a baixa mobilidade do Ba no solo estava relacionada à sua precipitação nas formas de sulfato e carbonato. Ademais, Ba e Zn são adsorvidos pelos colóides do solo. O Ba, por sua vez pode ainda ser retido por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. As concentrações de Ni e Pb, igualmente, aumentaram em todas as camadas do solo ao longo dos períodos de cultivo, independentemente da água utilizada. Wahla e Kirkham (2008) observaram que a irrigação com água salina aumentava a concentração de Pb na água de drenagem.

Masona et al. (2011), avaliando o acúmulo metais pesados em solo arenoso irrigado com água de reuso por três décadas, observaram acúmulo de Cd, Cr, Ni, Zn e Pb na camada de solo superficial (0-20 cm); todavia, os autores não apresentaram resultados para as outras camadas de solo. Os resultados da presente pesquisa também são compatíveis com os relatos de Khan et al. (2015) e Dere et al. (2006), os quais referiram-se a períodos de irrigação com água residuária por 40 e 100 anos, respectivamente. Salienta-se que a diferença temporal é muito grande em relação ao da presente pesquisa.

A avaliação da movimentação dos metais pesados no perfil do solo é de relevante importância, tendo em vista a possível contaminação do lençol d'água superficial.

Tabela 4. Teores de metais pesados em três camadas do solo (mg kg^{-1}) ao final do período de cultivo do abacaxizeiro ornamental irrigado, Fazenda Belém, Aracati, CE.

Camada do solo	Água ¹	Ba	Cd	Co	Cr	Ni	Pb	Zn
0 - 20	ACA	3,79 a	0,15 b	0,69 a	4,07 b*	1,54 b*	5,61 b*	8,91 b
	APF	6,28 a	0,21 a	0,62 a	6,47 a	2,37 a	11,17 a	14,22 a
	APO	4,36 a	0,23 a	0,76 a	6,52 a	2,40 a	12,64 a	12,29 a
		4,81	0,20	0,69	5,69	2,10	9,81	11,81
20 - 40	ACA	2,23 a	0,17 a*	2,43 a ²	5,86 a*	2,27 a*	10,50 a*	7,37 a
	APF	2,06 a	0,19 a	0,78 b	5,62 a	2,12 a	10,87 a	6,52 a
	APO	2,24 a	0,19 a	0,81 b	4,28 b	1,54 b	7,46 b	4,64 b
		2,18	0,18	1,34	5,25	1,97	9,61	6,18
40 - 60	ACA	2,22 a	0,20 a	0,79 a	6,06 a*	2,30 a*	10,77 a*	7,42 a
	APF	2,09 a	0,21 a	0,82 a	5,69 a	2,20 a	10,41 a	8,51 a
	APO	2,53 a	0,19 a	0,81 a	5,91 a	2,50 a	11,97 a	6,60 a
		2,28	0,20	0,80	5,88	2,33	11,05	7,51

¹Médias seguidas da mesma letra na coluna, por camada, não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de significância, exceto para Cobalto (Co), na camada de 20 a 40 cm, para qual o teste Kruskal-Wallis indicou que, ²médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si a 5% de significância. *Variável transformada pelo método de Box-Cox.

Tabela 5. Teores de metais pesados nas três camadas do solo (mg kg^{-1}) ao final do período de cultivo de girassol oleífero irrigado, Fazenda Belém, Aracati, CE.

Camada do solo	Água	Ba	Cd	Co	Cr	Ni	Pb	Zn
0-20	ACA	3,59 a*	0,21 a	0,55 b	8,45 a*	3,25 a*	13,26 a*	12,56 a*
	APF	3,60 a	0,18 a	0,84 a	1,84 c	0,52 b	2,08 b	5,21 b
	APO	3,18 a	0,18 a	0,89 a	2,59 b	0,72 b	2,75 b	4,62 b
	Média	3,46	0,19	0,76	4,29	1,50	6,03	7,46
20-40	ACA	3,39 a*	0,17 a*	0,67 a	8,10 a*	3,22 a*	13,16 a*	10,91 a
	APF	3,29 a	0,17 a	0,90 a	2,22 b	0,56 b	2,49 b	3,51 b
	APO	2,02 a	0,08 a	0,76 a	5,58 ab	2,71 a	10,89 ab	5,94 ab
	Média	2,90	0,14	0,78	5,30	2,16	8,85	6,79
40-60	ACA	3,34 a*	0,20 a	0,60 b	8,12 a*	3,17 a*	12,90 b	10,06 a
	APF	3,27 a	0,20 a	0,79 a	2,62 b	0,56b	2,91 c	5,98 b
	APO	3,22 a	0,21 a	0,82 a	8,43 a	3,13 a	17,35 a	10,82 a
	Média	3,28	0,20	0,74	6,39	2,29	11,05	8,95

¹Médias seguidas da mesma letra na coluna, por camada, não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de significância. *Variável transformada pelo método de Box-Cox.

Tabela 6. Teores de metais pesados em três camadas do solo (mg kg^{-1}) ao final do período de cultivo de mamoneira irrigada, Fazenda Belém, Aracati, CE.

Camada do solo	Água ¹	Ba	Cd	Co	Cr	Ni	Pb	Zn
0-20	ACA	4,05 a	0,27 a*	0,83 a	8,20 a ²	3,12 a ²	6,78 a*	14,00 a
	APF	3,23 a	0,17 a	0,91 a	2,06 b	0,48 b	3,02 b	3,78 b
	APO	3,60 a	0,20 a	0,77 a	8,20 a	3,15 a	7,83 a	11,52 a
	Média	3,63	0,21	0,84	6,15	2,25	5,88	9,77
20-40	ACA	3,69 a	0,19 a	0,64 a	7,75 a*	2,99 a*	7,14 a*	11,93 a
	APF	2,89 a	0,16 a	0,73 a	1,94 b	0,54 b	2,05 b	5,17 b
	APO	3,18 a	0,16 a	0,74 a	8,44 a	3,03 a	7,73 a	8,65 ab
	Média	3,25	0,17	0,71	6,05	2,19	5,64	8,58
40-60	ACA	3,97 a	0,17 a	0,54 a	8,24 a*	3,20 a*	7,83 a	11,11 a
	APF	3,20 a	0,23 a	0,77 a	2,14 b	0,54 b	2,94 b	4,53 b
	APO	3,20 a	0,20 a	0,64 a	8,63 a	3,22 a	8,91 a	9,53 a
	Média	3,46	0,20	0,65	6,34	2,32	6,56	8,39

¹/Médias seguidas da mesma letra na coluna, por camada, não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de significância, exceto para Cromo (Cr) e Níquel (Ni), na camada de 0 a 20 cm, para os quais o teste Kruskal-Wallis indicou que, ²/médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si a 5% de significância.

*Variável transformada pelo método de Box-Cox.

A quantidade de metais (exógenos) aportados para a camada de solo de 0-20 cm de espessura, pelas três águas, foi calculada pela diferença entre os valores encontrados pós-cultivos e àqueles antes.

Por sua vez, a migração dos metais da camada 0-20 cm para a inferior (20 - 40 cm) foi calculada de modo semelhante (Tabela 7). Tanto os valores do aporte como os da migração variaram de um para outro elemento, bem como de uma para outra água. A migração do Ba variou de 5,8% no solo irrigado com ACA para 10,8% e 13,0% nos tratamentos com APF e APO, respectivamente. A baixa migração do Ba, em comparação com os outros elementos, foi atribuída à precipitação pelos carbonatos contidos nas águas, principalmente na APF. Resultados semelhantes foram relatados por Kabata-Pendias (2011). O percentual de migração do Cr, Ni, Pb e Zn no solo irrigado obedeceu à seguinte ordem: ACA> APO>APF. Em média, os valores obtidos neste trabalho são compatíveis com os relatados por Li et al. (2009). Salienta-se que a migração está associada a fatores como: textura do solo, teores de

matéria orgânica, de óxidos e hidróxidos de Fe e Al, do estado de oxidação, do grau de hidratação e de raio iônico do elemento, além do pH e teor de sais nas águas.

Tabela 7. Quantidades de metais pesados adicionadas ao solo (camadas de 0-20 cm e 20-40 cm de profundidade), devidas à irrigação ao final dos cultivos, Fazenda Belém, Aracati, Ceará.

	Ba	Cd	Co	Cr	Ni	Pb	Zn
	kg ha ⁻¹						
	ACA						
a*	2,2	0	0	3,6	1,7	5,5	9,5
b	0,1	0	0	4,7	2,1	7,5	5,2
a + b	2,3	0	0	8,3	3,8	12,9	14,7
%	4,3	0	0	56,6	55,3	58,1	35,4
	APO						
a	2,2	0	0	3,8	1,7	6,0	9,2
b	0,3	0	0	2,8	1,3	4,0	3,5
a + b	2,6	0	0	6,6	3,0	10,0	12,7
%	11,5	0	0	42,4	43,3	40,0	27,6
	APF						
a	2,8	0	0	4,4	2,0	6,9	10,9
b	0,3	0	0	2,8	1,3	4,0	3,5
a + b	3,1	0	0	7,2	3,3	10,9	14,4
%	9,7	0	0	38,9	39,4	36,7	24,3

* a: conteúdos dos elementos exógenos na camada de 0 - 20 cm; b: conteúdos dos elementos exógenos na camada de 20 - 40 cm; %: percentual de migração de 0 - 20 cm para 20 - 40 cm; APO: Água produzida tratada por osmose reversa; APF: Água produzida filtrada; ACA: Água captada do aquífero Açu.

A irrigação do solo com as águas APO, APF e ACA afetou algumas das características químicas e físico-químicas do solo, interferindo, conseqüentemente, na absorção de metais pelas plantas. As alterações observadas nos valores do pH do solo e da CE do extrato saturado certamente influenciaram a mobilidade e a atividade dos metais, alterando sua absorção pelas plantas. Nigan et al. (2001) relataram que o pH do solo interferia na mobilidade e na bioatividade de metais pesados.

As quantidades de Ba, Cd, Co, Cr, Ni, Pb e Zn absorvidas pelas raízes, translocadas e acumuladas nas plantas, variaram de uma para outra espécie

vegetal (Tabelas 8, 9 e 10); resultados similares foram relatados por Silva et al. (2007), Khan et al. (2008) e Ahmad; Goni (2010).

Tabela 8. Bioacumulação de metais pesados em abacaxizeiro ornamental irrigado com água produzida, Fazenda Belém, Aracati, Ceará.

Parte da planta	Água	Ba*	Cd	Co	Cr	Ni	Pb	Zn
Aérea	ACA	3,47 a ¹	< 0,01	< 0,01	7,68 a	2,73 a	0,82 a	12,26 ab
	APF	2,85 a	< 0,01	0,05	7,72 a	2,74 a	1,44 a	10,78 b
	APO	2,42 a	< 0,01	< 0,01	8,10 a	2,79 a	1,05 a	13,66 a
	Média	2,91	< 0,01	0,02	7,83	2,75	1,10	12,24
Raiz	ACA	5,20 a	0,08 b	0,22 b	7,57 a	2,99 a	0,58 b	11,09 a
	APF	5,36 a	0,07 b	0,20 b	7,29 a	3,00 a	1,01 a	10,46 a
	APO	3,47 b	0,93 a	1,03 a	5,65 b	2,88 a	1,28 a	7,33 b
	Média	4,68	0,36	0,48	6,84	2,96	0,95	9,63

APO: Água tratada por osmose reversa; APF: Água filtrada; ACA: Água captada no aquífero Açu. *As variáveis foram transformadas pelo método de Box-Cox, exceto Bário – Cd e Co não foram detectados na parte aérea. ¹Médias seguidas da mesma letra na coluna, por parte da planta, não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de significância.

Tabela 9. Bioacumulação de metais pesados em plantas de girassol granífero, irrigadas com água produzida, Fazenda Belém, Aracati, Ceará.

Parte da planta	Água	Ba	Cd	Co	Cr+3	Ni	Hg	Pb*	Zn*
Semente	ACA	0,27 a	3,20 a	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,02 a	54,63 a
	APF	0,35 a	2,17 a	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,59 b	51,90 a
	APO	0,00 a	0,00 b	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,36 a	52,65 a
	Média	0,20	1,79	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,99	53,06
Aérea	ACA	10,94 a	< 0,01	< 0,01	0,27	< 0,01	< 0,01	1,69 a	54,89 a
	APF	11,52 a	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	3,22 a	50,77 a
	APO	8,38 b	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	2,18 a	47,01 a
	Média	10,28	< 0,01	< 0,01	0,09	< 0,01	< 0,01	2,37	50,89
Raiz	ACA	38,30 a	2,93 a	< 0,01	1,59 b	< 0,01	0,10 a	1,89 a	40,45 b
	APF	25,53 b	2,43 a	< 0,01	0,99 b	< 0,01	0,02 a	1,62 a	30,69 b
	APO	44,17 a	10,49 a	< 0,01	3,65 a	< 0,01	0,12 a	4,42 a	62,02 a
	Média	36,00	5,28	< 0,01	2,08	< 0,01	0,08	2,64	44,39

APO: água tratada por osmose reversa; APF: água filtrada; ACA: água captada do aquífero Açu. *Variáveis foram transformadas pelo método de Box-Cox. ¹Médias seguidas na mesma na coluna, por parte da planta, não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de significância.

Tabela 10. Bioacumulação de metais pesados em mamoneira irrigada com água produzida, Fazenda Belém, Aracati, Ceará.

Parte da planta	Água	Ba *	Cd	Co	Cr	Ni	Pb *	Zn *
Semente	ACA	0,84 a	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,56 a	42,25 a
	APF	1,02 a	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,39 a	38,68 a
	APO	0,18 b	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,23 a	40,07 a
	Média	0,68	0,00	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,39	40,33
Aérea	ACA	6,93 b	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,98 a	24,72 a
	APF	9,50 a	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,73 a	19,03 a
	APO	5,07 b	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,65 a	23,67 a
	Média	7,17	0,00	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,79	22,48
Raiz	ACA	4,63 b	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,61 ab	17,51 a
	APF	6,59 a	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,97 a	21,72 a
	APO	4,88 b	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,34 a	22,54 a
	Média	5,37	0,00	< 0,01	< 0,01	< 0,01	1,64	20,59

APO: água tratada por osmose reversa; APF: água filtrada; ACA: água captada do aquífero Açu. *Variáveis foram transformadas pelo método de Box-Cox. ¹/Médias seguidas na mesma na coluna, por parte da planta, não diferem entre si pelo teste Tukey, a 5% de significância.

Os elementos de Ba, Pb e Zn foram detectados em todas as raízes e partes aéreas das espécies avaliadas, sendo que os maiores valores foram constatados nas raízes do girassol. Tais elementos também foram encontrados nas sementes de girassol e mamoneira. Com relação ao Co, o elemento somente foi constatado nas raízes e traços na parte aérea do abacaxizeiro. O Cd, por sua vez, foi encontrado nas raízes e sementes de girassol e traços na parte aérea do abacaxizeiro. Quanto ao Ni, observou-se que o abacaxizeiro absorveu e translocou para a parte aérea. Por sua vez, no girassol constatou-se que apenas as raízes foram capazes de absorver traços do elemento. Os resultados obtidos permitiram mostrar as variações entre espécies vegetais sobre absorção, acúmulo e transporte de metais para os seus tecidos, confirmando, desse modo, com as observações feitas por Nookabkaew et al. (2006) e Silva et al. (2007).

Avaliou-se, também, a transferência de metais do solo para as plantas, que foi calculada como a relação entre a concentração do elemento no solo e sua concentração na planta (Cui et al., 2004). Tal fator permite entender a extensão do risco associado entre a água de irrigação e a acumulação do elemento no vegetal (Tabelas 11 e 12). Na avaliação dos resultados, constatou-se que eles estão em concordância com os relatados por Cui et al. (2004); Masona et al. (2011); e Khan et al. (2015), para outras culturas, solos e condições climáticas.

Salienta-se que a absorção dos metais pesados pelas raízes não é igualitária para todas as plantas, tendo em vista a concentração de cada elemento no solo, a acidez/alcalinidade do meio, a sensibilidade das plantas, entre outros. Os resultados obtidos demonstraram que o abacaxizeiro não apresentou seletividade na absorção dos sete elementos estudados. Por sua vez, a mamoneira revelou elevada seletividade, não sendo capaz de absorver Cd, Co, Cr e Ni, enquanto o girassol foi bastante eficiente na absorção do Ba, Cd e Zn, baixa eficiência para Cr, Ni e Pb e ineficiente na absorção do Co.

Com relação à transferência das raízes para as partes aéreas, observou-se dissimilaridade para as três espécies. Os valores da transferência do Ba e Zn foram crescentes do abacaxizeiro para o girassol.

Tabela 11. Fator de transferência dos metais pesados do solo para as raízes nos cultivos irrigados de girassol, mamona e abacaxizeiro ornamental, Fazenda Belém, Aracati, Ceará.

Cultura	Ba	Cd	Co	Cr	Ni	Pb	Zn
Abacaxi	1,01	0,33	0,29	1,35	1,49	0,08	0,91
Mamona	1,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	1,43
Girassol	6,92	19,83	0,00	0,40	0,42	0,34	3,89

Tabela 12. Fator de transferência dos metais pesados do solo para a parte aérea nos cultivos irrigados de girassol, mamona e abacaxizeiro ornamental, na Fazenda Belém, em Aracati, Ceará.

Cultura	Ba	Cd	Co	Cr	Ni	Pb	Zn
Abacaxi	0,64	0,00	0,00	1,44	1,37	0,12	1,08
Mamona	1,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	1,53
Girassol	2,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	4,37

Conclusões

As águas produzidas filtradas (APF) e filtrada e tratada por osmose reversa (APO), obtidas na fazenda Belém da Petrobras e utilizadas na irrigação de mamona, girassol grãos e abacaxi ornamental, não afetaram os teores totais de metais pesados do solo em relação à água do aquífero Açu.

Essas espécies, quando irrigadas com água produzida, são capazes de absorver os metais pesados, concentrando-os principalmente nas raízes. É recomendado o monitoramento dos metais nas águas residuais dos campos petrolíferos e no sistema solo-planta de áreas irrigadas com essas águas produzidas.

Considerando-se a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente, os valores limites na irrigação com as águas produzidas não oferecem risco de contaminação do solo e das plantas não comestíveis testadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras – Termo de Cooperação 0050.0065234.11.9 – pelo financiamento da pesquisa.

Referências

ABREU, M. F. de; ABREU, C. A. de; ANDRADE, J. C. de. Determinação de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, cobre, ferro manganês, zinco, níquel, cádmio, cromo e chumbo em ácido nítrico usando métodos da US-EPA. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: IAC, 2001. p. 251-261.

AHMAD, J. U.; GONI, A. Heavy metal contamination in water, soil, and vegetables of the industrial areas in Dhaka, Bangladesh. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 166, p. 347-357, 2010.

ARTHUR, J. D.; LANGHUS, B. D.; PATEL, C. **Technical summary of oil & gas produced water treatment technologies**. Tulsa: ALL Consulting: LLC, 2005, 53 p.

BRAGA JUNIOR, M. G.; MELO, J. G.; DINIZ FILHO, J. B. Comportamento hidrodinâmico e hidroquímico do sistema aquífero Barreiras-Jandaíra-Açu na área da fazenda Belém, Oeste da Bacia Potiguar. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 3, p. 222-242, 2017.

CHRISTOFIDIS, D. **Irrigação a fronteira hídrica na produção de alimentos**. Brasília, DF: ABID 2002. p. 46-55. (Irrigação e tecnologia moderna, n. 54).

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, nº 249, de 30/12/2009. p. 81-84

CRISOSTOMO, L. A.; WEBER, O. B.; MIRANDA, F. R. de; ARAGÃO, F. A. S. de; OLIVEIRA, M. E. B. de. **Irrigação com água produzida efeitos sobre características do solo e a produção de girassol**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2016. 35 p. (Embrapa Agroindústria Tropical. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 120).

CRISOSTOMO, L. A.; WEBER, O. B.; MIRANDA, F. R. de; ARAGÃO, F. A. S. de; BEZERRA, F. C.; MOSCA, J. L. **Reuso da água produzida na irrigação do abacaxizeiro ornamental- efeitos sobre as características químicas do solo**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2018. 27 p. (Embrapa Agroindústria Tropical. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 158).

CUI, Y. J.; ZHU, Y. G.; ZHAI, R. H.; CHEN, D. Y.; HUANG, Y. Z.; QIU, Y.; LIANG, J. Z. Transfer of metals from soil to vegetables in area near a smelter in Nanning, China. **Environment International**, v. 30, p. 785-791, 2004.

DERE, C.; LAMY, I.; CORNU, S.; VAN OORT, F.; BAISE, D. Trace metal inputs reconstitution and migration in a sandy Luvisol after 100 years of massive irrigation with wastewater. **Compètes Rendus Geoscience**, v. 338, n. 8, p. 565-573, 2006.

FAO. **FAO Statistical Pocketbook 2015**: world food and agriculture. Rome, 2015. 231 p. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i4691e.pdf>>. Acesso: 02 mar. 2018.

GOLDEMBERG, J.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A.; LUCCHESI, R. Oil and natural gas prospects in South America: can the petroleum industry pave the way for renewable in Brasil? **Energy Policy**, v. 64, p. 58-70, 2014.

IGUNNU, E. T.; CHEN, G. Z. Produced water treatment technologies. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 9, p. 157-177, 2014.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 505 p.

KHAN, S.; LIU, X.; SHAH, B. R.; FAN, W.; LI, H.; KHAN, S. B.; AHMAD, Z. Metals uptake by wastewater irrigated vegetable and their daily intake in Peshawar, Pakistan. **Ecological Chemistry and Engineering S**. v. 22, n. 1, p. 125-139, 2015.

KHAN, S.; CAO, Q.; ZHENG, Y. M.; ZHU, Y. G. Health risk of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, **China Environmental Pollution**, v. 152, n. 3, p. 686-692, 2008.

LI, P.; WANG, X.; ALLISON, G.; LI, X.; XIONG, X. Risk assessment of heavy metals in soil previously irrigated with industrial wastewater in Shenyang, China. **Journal of Hazardous Materials**, v. 161, n. 1, p. 516-521, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127736>><https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127736>>.

MASONA, C.; MAPFAIRE, I.; MAPURAZI, S.; MAKANDA, R. Assessment of heavy metal accumulation in wastewater irrigated soil and uptake by maize plants (*Zea Mays* L) at Firle farm in Harare. **Journal of Sustainable Development**, v. 4, n. 6, p. 132-137, 2011.

MIRANDA, F. R. de; CRISOSTOMO, L. A.; WEBER, O. B.; BARBOSA, F. L.; ARAGÃO, F. A. de S.; OLIVEIRA, M. E. B. de. **Irrigação com água produzida na extração de petróleo**: efeitos sobre a salinidade do solo e a produtividade da mamoneira. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2016. 29 p. (Embrapa Agroindústria Tropical. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 118). Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/147549/1/BPD16010.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

MOTA, S. D.; AQUINO, M. D. de; SANTOS, A. B. dos. Reuso de águas: conceitos, importância, tipos. In: MOTA, S. D.; AQUINO, M. D. de; SANTOS, A. B. dos. (Org.). **Reuso de águas em irrigação e piscicultura**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará/ Centro de Tecnologia, 2007. p. 21-37

MOTTA, A. R. P.; BORGES, C. P.; KIPERSTOCK, A.; ESQUERRE, K. P.; ARAÚJO, P. M.; BRANCO, L. P. N. Tratamento de água produzida de petróleo para remoção de óleo por processos de separação por membranas: revisão. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 15-26, 2013.

NIGAM, R.; SRIVASTAVA, S.; PRAKASH, S.; SRIVASTAVA, M. M. Cadmium mobilization and plant availability-the impact of organic acids commonly exuded from roots. **Plant and Soil**, v. 230, p. 107-113, 2001.

NOOKABKAEW, S.; RAMGKADILOK, N.; SATAYAVIVAD, J. Determination of trace elements in herbal tea products and their infusions consumed in Thailand. **Journal of Agriculture and Food. Chemistry**, v. 54, p. 6939-6944, 2006.

OLIVEIRA, A. C. de; CRUZ, R. L.; BISCARO, G. A.; MOTOMIYA, A. V. de A. FREIRE, M. Use of ferrous water for drip irrigation of ornamental sunflower in pots. **Irriga**, v. 19, p. 245-254, 2014.

PRATT, P. F.; ALBASEL, N.; JOSEPH, H.; RESCO, C. **Trace elements guidelines for irrigation waters in the San Joaquin Valley**. Riverside: University of California: Water Resources Control Board, 1988. 123 p. Final Draft Report - Part I.

RAIJ, B. VAN; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações**

de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas, Instituto Agronômico IAC, 1997. (Instituto Agronômico. Boletim técnico, 100).

RAJKUMAR, M.; SANDHYA, S.; PRASAD, M. N. V.; FREITAS, H. Perspectives of plant-associated microorganisms in heavy metal phytoremediation. **Biotechnology Advances**, v. 30, p. 1562-1574, 2012.

SILVA, F. C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** ed. rev. ampl.- Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

SILVA, M. L. de S.; VITTI, G. C.; TREVIZAN, A. R. Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 4, p. 527-535, 2007.

SINGH, A.; SHARMA, R. K.; AGRAWAL, M.; MARSHALL, F. M. Risk assessment of heavy metal toxicity thorough contaminated vegetables from waste water irrigated area of Varanasi, India. **Tropical Ecology**, n. 51, v. 24, p. 375-387, 2010.

WAHLA, I. H.; KIRKHAM, M. B. Heavy metal displacement in salt-water-irrigated soil during phytoremediation. **Environmental Pollution**, 155 271-2830, 2008.

WEBER, O. B.; CRISOSTOMO, L. A.; MIRANDA, F. R. de; SOUSA, A. F.; MESQUITA, A. L. M.; CABRAL, E. de O. Production of ornamental sunflower irrigated with oilfield produced water in Brazilian semiarid region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 6, p. 441-452, 2017

XU, P.; DREWES, J. E.; HEIL, D. Beneficial use of co-produced water through membrane treatment: technical-economic assessment. **Desalination**, v. 225, p. 139-155, 2008.



Agroindústria Tropical



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO