

## Soil management in Brazilian states: comparative analyzes of Physical and Monetary Soil Nutrient Balance in 2005 and 2015

### *Gestão do solo em estados brasileiros: análise comparativa do balanço físico e monetário de nutrientes do solo nos anos de 2005 e 2015*

Wladimir Colman de Azevedo Junior<sup>1\*</sup>, Marcos Rodrigues<sup>2</sup>

**Abstract:** Intensive agricultural production tends to stimulate the outflow of nutrients from the soil, requiring producers to properly manage the soil to avoid reducing fertility in the following crops. Thus, the objective was to estimate the annual monetary balance of nutrients in the soil of six Brazilian states that present the highest consumption of inorganic fertilizers in the years 2005 and 2015. The Annual Balance of Nutrients in Soil was used to calculate the physical and monetary balance of nutrients, in the main crops of these States, by quantifying the export of N, P, K from the soil by plants and the insertion of nutrients, through the application of fertilizers, fertigation, and biological fixation. The monetary balance of N, P and K added for the six states was positive and increased by 114% between 2005 and 2015, however, the balance of P for the state of Paraná was negative in 2015 reaching R\$ 1,769.17. The balances and Mato Grosso, Rio Grande do Sul, and Paraná were higher concerning Goiás, São Paulo, and Minas Gerais. Except for Paraná, related to P, there was no positive depreciation of the associated NPK nutrients. The different flows, in the comparison among states, are caused by the different dynamics of land use, mainly in the size of the corn and soybean cultivation area.

**Key words:** Monetary balance of soil nutrients. Brazil. Depletion. Soil fertility. Agricultural soil.

**Resumo:** A produção agrícola intensiva tende a estimular os fluxos de saída de nutrientes do solo, exigindo que os produtores o manejem adequadamente para evitar a redução da fertilidade nas safras seguintes. Assim, objetivou-se estimar o saldo monetário anual de nutrientes no solo dos seis estados brasileiros que apresentaram maior consumo de fertilizantes inorgânicos nos anos de 2005 e 2015. O balanço anual de nutrientes do solo foi utilizado para calcular o saldo físico e monetário de nutrientes, nas principais culturas agrícolas desses estados, pela quantificação da exportação de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) do solo pelas plantas e da inserção de nutrientes, via aplicação de fertilizantes, fertirrigação e fixação biológica. O saldo monetário de N, P e K somados para os seis estados foi positivo e apresentou elevação de 114% entre 2005 e 2015, no entanto, o saldo de P para o estado do Paraná foi negativo em 2015, atingindo R\$ 1.769,17. Os saldos de Mato Grosso, Rio Grande do Sul e Paraná foram mais elevados em relação aos de Goiás, São Paulo e Minas Gerais. À exceção do Paraná, para o P, não houve depreciação positiva dos nutrientes NPK somados. Os fluxos distintos, na comparação entre estados, são causados pela dinâmica do uso da terra, principalmente, no tamanho da área de cultivo de milho e soja.

**Palavras-chave:** Balanço monetário de nutrientes do solo. Brasil. Depleção. Fertilidade do solo. Solo agrícola.

\*Corresponding author

Submitted for publication on 13/03/2020, approved on 21/06/2020 and published on 16/07/2020

<sup>1</sup>Doutor em Desenvolvimento Socioambiental (NAEA/UFPA). Professor da Faculdade de Economia da Universidade Federal de Mato Grosso. Av. Fernando Corrêa, 2367, Cuiabá, MT. 78060-900. E-mail: azevedocolman@gmail.com

<sup>2</sup>Doutor em Desenvolvimento Socioambiental (NAEA/UFPA). Professor da Universidade Federal Rural da Amazônia. E-mail: marcos.rodrigues.adm@gmail.com

## INTRODUCTION

Among 2005 and 2015, agricultural area harvested in the Brazilian territory was reduced by 1%. The consumption of inorganic fertilizers, however, was increased by 50% (ANDA, 2016). This growth in fertilizer consumption reveals the importance of soil nutrient management for fertility recovery to happen significantly faster than its resilience and cultivation in non-fertile areas (CUNHA *et al.*, 2010). Furthermore, a sustainable agricultural system needs to maintain nutrient reserves; otherwise, there will be a higher potential for negative environmental impacts, that, sometimes, extend beyond the limits of the agricultural unit (MOLINA *et al.*, 2015; VITOUSEK *et al.*, 2009).

After harvest, the soil may have: i) negative nutritional balance that indicates a reduction of fertility; ii) positive balance, which reveals that the productive system spent resources destined to the application of nutrients in addition to the amount effectively extracted from the soil, by cultivation (CERRETELLI *et al.*, 2018; ONU, 2014). In the first case, there is a soil depreciation (FEIJÓ; RAMOS, 2017). With the capital fixed for cultivation, the soil with a negative nutritional balance would need to the allocation of financial resources in order to produce efficiently again (ONU, 2014).

The excess (positive balance) may represent an investment, as part of this excess can increase the initial level of nutrients (FEIJÓ; RAMOS, 2017). Though, when this positive balance overdoes the amount of soil support (colloidal soil system), nutrient leaching can occur and their reaction with other chemical elements present in the soil; in this case, there would be the loss of a productive resource (ALLEONI *et al.*, 2016; ANDRADE, 2016). Moreover, the excess could cause negative externalities, such as increased soil salinity and eutrophication. Thus, the appropriate nutritional management of the soil must seek a balance close to the equilibrium between inflow and outflow of nutrients (CUNHA *et al.*, 2014; CARMO *et al.*, 2017).

There are in literature records of different methodologies adopted to estimate soil nutrient flows, such as in Sheldrick *et al.* (2003) and Chen *et al.* (2016) when studying Chinese soil. Carmo *et al.* (2017) investigate the impacts of inorganic fertilizers uses in Portuguese soil. In Spain, the effects of socio-ecological change, which occurred in rural areas on the level of nutrients in the soil, were analyzed by Molina *et al.* (2015). Also, Comparative analyzes between nutrient contents into soils in different countries were conducted by Vitousek *et al.* (2009) and MacDonald *et al.* (2011).

## INTRODUÇÃO

Entre 2005 e 2015, a área agrícola colhida em território brasileiro foi reduzida em 1%. O consumo de fertilizantes inorgânicos, no entanto, foi ampliado em 50% (ANDA, 2016). Esse crescimento no consumo de fertilizantes revela a importância da gestão de nutrientes do solo, para a recuperação da fertilidade em ritmo mais acelerado que sua resiliência e o cultivo em áreas não férteis (CUNHA *et al.*, 2010). Ademais, um sistema agrícola sustentável precisa manter as reservas de nutrientes, caso contrário, ter-se-á maior potencial de ocorrência de impactos ambientais negativos, que, por vezes, extrapolam os limites das unidades agrícolas (MOLINA *et al.*, 2015; VITOUSEK *et al.*, 2009).

Após a colheita, o solo pode apresentar: i) saldo nutricional negativo que indica uma redução da fertilidade; ii) saldo positivo que, por sua vez, revela que o sistema produtivo dispendeu recursos destinados a aplicação de nutrientes além da quantidade efetivamente extraída do solo, pelo cultivo (CERRETELLI *et al.*, 2018; ONU, 2014). No primeiro caso, tem-se a depreciação do solo (FEIJÓ; RAMOS, 2017). Como capital imobilizado para o cultivo, o solo com saldo nutricional negativo, necessitará da alocação de recursos financeiros para que volte a produzir com eficiência (ONU, 2014).

O excedente (saldo positivo) pode representar um investimento, pois parte desse excedente pode resultar em acréscimo ao nível inicial de nutrientes (FEIJÓ; RAMOS, 2017). Entretanto, quando esse excedente supera a quantidade de suporte do solo (sistema coloidal do solo) pode ocorrer a lixiviação dos nutrientes e a reação desses com outros elementos químicos presentes solo, nesse caso, ter-se-ia perda de recursos produtivos (ALLEONI *et al.*, 2016; ANDRADE, 2016). O excedente, ainda, pode provocar externalidades negativas como aumento da salinidade do solo e a eutrofização (VITOUSEK *et al.*, 2009). Dessa forma, o correto manejo nutricional do solo deve buscar um saldo próximo ao equilíbrio entre entrada e saída de nutrientes (CUNHA *et al.*, 2014; CARMO *et al.*, 2017).

A literatura registra distintas metodologias adotadas para estimar os fluxos de nutrientes do solo, como em Sheldrick *et al.* (2003) e Chen *et al.* (2016) ao estudarem o solo Chinês. Carmo *et al.* (2017) estudaram os impactos do uso de fertilizantes inorgânicos no solo português. Na Espanha, os efeitos da mudança socioecológica, ocorrida no meio rural sobre o nível de nutrientes no solo, foram analisados por Molina *et al.* (2015). Análises comparativas entre teores de nutriente nos solos de diversos países foram realizadas por Vitousek *et al.* (2009) e MacDonald *et al.* (2011).

In Brazil, Cunha *et al.* (2010; 2011; 2018) found a positive surplus when counting the nutrient balance. Cunha *et al.*, 2014, working with data from 2009 to 2012, noticed a nutritional deficit only regarding molybdenum (Mo). The research carried out in Brazil used soil nutrient balance to estimate flows and quantify the physical balance of nutrients.

The soil flows and nutrient balance has been monetized by multiplying the prices from each nutrient by physical values getting on the soil-plant system (ONU, 2014). This is the advance developed in this study, since the articles that estimated physical flows did not carry out their monetization. In this sense, the improvement is justified by the relevance of nutrients to ensure production efficiency and to minimize environmental impacts related to soil exploration.

The hypothesis raised was that agricultural production intensifies the outflow of nutrients from the soil in amounts greater than the inflows. Consequently, after each harvest, the Brazilian states selected in this study would present soils with a higher deficiency of the nutrients. For testing this hypothesis, input and output physical flows of nutrients from the soil of each state were estimated, verifying, thus, the effect of agricultural production on the nutrient content. Then, the annual monetary balance was calculated, inferring whether there was nutrient depletion on the soil and at what intensity. Therefore, this study aimed to estimate the annual monetary balance of Nitrogen (N), Phosphorus (P), and Potassium (K) from the soil of the states of Mato Grosso, Rio Grande do Sul, Paraná, Minas Gerais, São Paulo, and Goiás since they present the highest demand for inorganic fertilizers, in the years 2005 and 2015.

## MATERIAL AND METHODS

### Study area

The flow of nutrients in agricultural soil was calculated for the years 2005 and 2015, in the states of Mato Grosso, Rio Grande do Sul, Paraná, Minas Gerais, São Paulo, and Goiás, selected for representing, respectively, the largest fertilizer consumers in the country, in 2015. In that year, the planted area of these states was mainly used for the cultivation of soybeans, corn, cotton, tomatoes, beans, sugarcane, coffee, wheat, rice, tobacco, potatoes, orange, and bananas, crops that concentrated about 91% of the delivered inorganic fertilizers. Agricultural soil should be understood as 0 - 0.20 m soil layers located on the surface of the cultivated lands, where most of the roots of the studied crops are concentrated.

No Brasil, Cunha *et al.* (2010; 2011; 2018) encontraram saldos positivos ao contabilizarem o balanço de nutrientes. Trabalhando com dados de 2009 a 2012, Cunha *et al.*, 2014 encontraram déficit nutricional somente quanto ao molibdênio (Mo). Os trabalhos desenvolvidos sobre o Brasil utilizaram o balanço de nutrientes do solo para estimar os fluxos e quantificar o saldo físico de nutrientes.

A monetização dos fluxos e do saldo de nutrientes do solo é realizada por meio da multiplicação dos preços, de cada nutriente, pelos valores físicos movimentados no sistema solo-planta (ONU, 2014). Esse é o avanço realizado nesse trabalho, pois os artigos que estimaram os fluxos físicos não realizaram a sua monetização. Esse avanço se justifica pela relevância dos nutrientes para a garantia da eficiência produtiva e para a minimização dos impactos ambientais relativos à exploração do solo.

A hipótese levantada é que a produção agrícola intensifica a saída de nutrientes do solo em quantidades superior aos fluxos de entrada. Consequentemente, após cada safra, os estados brasileiros selecionados nesse estudo apresentariam solos mais pobres em nutrientes. Para verificar essa hipótese, estimam-se os fluxos físicos de entrada e saída de nutrientes do solo de cada estado, verificando assim o efeito da produção agrícola sobre o teor de nutrientes do solo. Em seguida calcula-se o saldo monetário anual, inferindo se há depleção nutritiva do solo e em qual intensidade. Portanto, objetivou-se, com este trabalho, estimar o saldo monetário anual de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) no solo dos estados de Mato Grosso, Rio Grande do Sul, Paraná, Minas Gerais, São Paulo e Goiás, por possuírem maior demanda de fertilizantes inorgânicos, nos anos de 2005 e 2015.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

O fluxo de nutrientes no solo agrícola foi calculado para os anos de 2005 e 2015, nos estados de Mato Grosso, Rio Grande do Sul, Paraná, Minas Gerais, São Paulo e Goiás, selecionados por representarem, respectivamente, os maiores consumidores de fertilizantes do país, em 2015. Nesse ano, a área plantada desses estados foi destinada, principalmente, ao cultivo de soja, milho, algodão, tomate, feijão, cana-de-açúcar, café, trigo, arroz, fumo, batata, laranja e banana, culturas que concentraram cerca de 91% dos fertilizantes inorgânicos entregues. Por solo agrícola deve-se entender a camada de terra de 0 - 0,20 m localizada na superfície dos solos cultivados, onde se concentram a maior parte das raízes das culturas estudadas.

## Data used

The price variable was deflated by Prices General Index-Internal Availability (Portuguese acronym, IGP-DI) for December 2015 and was based on single superphosphate (SSP), for the balance of P, in urea, for N, and potassium chloride for K. According to the Statistical Yearbook of the sector, these fertilizers delivered most of the nutrients used by national agriculture in 2015.

The annual average price of each product, obtained through the Institute of Agricultural Economics (Portuguese acronym, IEA), linked to São Paulo state Department of Agriculture & Supply's<sup>3</sup> (Portuguese acronym, SAA-SP), was used to form a unified fertilizer value, per ton, calculating the average price of the three fertilizers weighted by the mean share of each nutrient in the final formulation of the total fertilizers delivered to the end consumer.

Data on national crop production have been obtained through the 2015 census of Municipalities Agricultural Production (IBGE, 2016), and data on the fertilizer market were made available by the Brazilian National Fertilizer Association (ANDA, 2016), by Fertilizer Statistical Yearbook 2015. These data refer to the 13 crops that used 91% of the inorganic fertilizers delivered in Brazil in 2015: soybeans, corn, cotton, tomatoes, beans, sugarcane, coffee, wheat, rice, tobacco, potatoes, oranges, and bananas.

## Methodological procedures

Physical balance of nutrients (PBNS) was measured through the difference between input and output of these elements into the soil, according to the methodology of the nutrient balance demonstrated in Equations (1), (2), and (3), and based on Cunha *et al.* (2014), Cunha *et al.* (2010, 2011, 2018), and explored by Vitousek *et al.* (2009). The balance was estimated for each state. The monetary balance was calculated from the result of the nutrient balance.

$$BN_i = Ne_i - Ns_i \quad (1)$$

$$BK_i = Ke_i - Ks_i \quad (2)$$

$$BP_i = Pe_i - Ps_i \quad (3)$$

In which:

$BN_i$ ,  $BK_i$  and  $BP_i$  balance of Nitrogen, Potassium, and Phosphorus, respectively, in state soil, at year  $i$ .

$Ne_i$ ,  $Ke_i$  and  $Pe_i$  total Nitrogen, Potassium, and Phosphorus, respectively, introduced into the state soil, at year  $i$ .

$Ns_i$ ,  $Ks_i$  and  $Ps_i$  total Nitrogen, Potassium, and Phosphorus, respectively, exported from the state soil, at year  $i$ .

## Dados utilizados

A variável preço foi deflacionada pelo IGP-DI para dezembro de 2015 e se baseia no superfosfato simples (SSP), para o saldo de P, na ureia, para N e cloreto de potássio para K. Conforme o Anuário Estatístico do setor, estes fertilizantes entregaram a maior parte dos nutrientes utilizados pela agricultura nacional em 2015.

O preço médio anual de cada produto, obtido por meio do Instituto de Economia Aplicada da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do estado de São Paulo<sup>3</sup> (IEA/SAA-ESP), foi utilizado para formar um preço unificado dos fertilizantes, por tonelada, calculando-se a média de preços dos três fertilizantes ponderada pela participação média de cada nutriente na formulação final do total de fertilizantes entregues ao consumidor final.

Os dados relativos à produção agrícola nacional foram obtidos por meio da pesquisa sobre a produção agrícola municipal de 2015 (IBGE, 2016), e os dados sobre o mercado de fertilizantes foram disponibilizados pela Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA, 2016), por meio do Anuário Estatístico do Setor de Fertilizantes de 2015. Estes dados se referem às 13 culturas que utilizaram 91% dos fertilizantes inorgânicos entregues no Brasil em 2015: soja, milho, algodão, tomate, feijão, cana-de-açúcar, café, trigo, arroz, fumo, batata, laranja e banana.

## Procedimentos Metodológicos

O saldo físico de nutrientes (SFNS) foi mensurado por meio da diferença entre entrada e saída destes elementos no solo, conforme a metodologia do balanço de nutrientes explicitada em (1), (2) e (3) e baseada em Cunha *et al.* (2014), Cunha *et al.* (2010, 2011, 2018) e explorada por Vitousek *et al.* (2009). O saldo foi estimado para cada estado. O saldo monetário, por sua vez, é calculado a partir do resultado do balanço de nutrientes.

$$SN_i = Ne_i - Ns_i \quad (1)$$

$$SK_i = Ke_i - Ks_i \quad (2)$$

$$SP_i = Pe_i - Ps_i \quad (3)$$

Em que:

$SN_i$ ,  $SK_i$  e  $SP_i$  saldo de Nitrogênio, Potássio e Fósforo, respectivamente, em solo estadual, no ano  $i$ .

$Ne_i$ ,  $Ke_i$  e  $Pe_i$  total de Nitrogênio, Potássio e Fósforo, respectivamente, introduzidos em solo estadual, no ano  $i$ .

$Ns_i$ ,  $Ks_i$  e  $Ps_i$  total de Nitrogênio, Potássio e Fósforo, respectivamente, exportados do solo estadual, no ano  $i$ .

<sup>3</sup>[http://ciagri.iea.sp.gov.br/bancoiea\\_Testes/pagos2.aspx?cod\\_sis=5](http://ciagri.iea.sp.gov.br/bancoiea_Testes/pagos2.aspx?cod_sis=5)

## Input and output of soil nutrients

There are on the scientific literature several methods for quantifying the flow of nutrients from agricultural soil. In general, the main difference among these methods is in the selection of nutrient input and output forms. Table 1 shows the variables adopted in national and international studies. Fertilizers, biological nitrogen fixation (BNF), and fertigation are the most used variables to account for the inflow of nutrients into the soil, while plant absorption is the main variable for registering outflow of these nutrients.

Vegetal absorption consists of the removal of nutrients from the soil by the roots of plants, so that they might develop. Only part of the absorbed elements should result in a reduction in the nutrient content from the soil at the end of the harvest. The non-commercial part of the plant, when decomposed, allows nutrients to return to the soil. On the other hand, the consumption of the commercial part causes the effective removal of nutrients, which is denominated as nutrient export (ALLEONI *et al.*, 2016; CUNHA *et al.*, 2018).

## Entrada e saída de nutrientes do solo

A literatura científica dispõe de algumas opções de métodos para quantificação do fluxo de nutrientes do solo agrícola. De modo geral, a principal distinção entre estes métodos se dá na seleção das formas de entrada e saída de nutrientes. A Tabela 1 dispõe as variáveis adotadas em trabalhos nacionais e internacionais. Os fertilizantes, a fixação biológica de nitrogênio (FBN) e a fertirrigação são as variáveis mais utilizadas para contabilizar o fluxo de entrada de nutrientes no solo, enquanto a absorção vegetal é a principal variável de registro dos fluxos de saída.

A absorção vegetal consiste na retirada de nutrientes do solo, pelas raízes das plantas, para que essas se desenvolvam. Apenas parte dos elementos absorvidos resultam em redução do teor de nutrientes do solo, ao fim da safra. A parte não comercial da planta, ao ser decomposta, permite que os nutrientes retornem ao solo. Por outro lado, o consumo da parte comercial ocasiona a efetiva retirada de nutrientes, resultando no que se denomina exportação de nutrientes (ALLEONI *et al.*, 2016; CUNHA *et al.*, 2018).

**Table 1** - Record in the literature of the variables used in this study

**Tabela 1** - Registro na literatura, das variáveis usadas neste trabalho

Authors	Input			Output
	BNF <sup>1</sup>	Fertilizers	Fertigation	Absorption
<b>Internationals</b>				
Vitousek <i>et al.</i> (2009)	✓	✓	✗	✓
MacDonald <i>et al.</i> (2011)	✗	✓	✗	✓
Carmo <i>et al.</i> (2017)	✓	✓	✗	✓
Chen <i>et al.</i> (2016)	✓	✓	✓	✓
<b>Nationals</b>				
Cunha <i>et al.</i> , Casarin and Prochnow (2010)	✓	✓	✓	✓
Cunha <i>et al.</i> , (2011)	✓	✓	✓	✓
Cunha <i>et al.</i> (2014)	✓	✓	✓	✓

<sup>1</sup>BNF = Biological Nitrogen Fixation; ✓ - present; ✗ - absent.

Source: Author's own Table.

<sup>1</sup>FBN = Fixação Biológica de Nitrogênio; ✓ - presente; ✗ - ausente.

Fonte: Autoria própria.

The estimate of the total amount of nutrients exported in agricultural soils was held by adding the product between the average content of the nutrient present in the commercial portion of a given crop by the total amount of products harvested in each state, per year, as in (4).

$$X_{S_i} = \sum(Lxc * Qc_i) \quad (4)$$

On what:

$X_{S_i}$  is the amount of nutrient X exported annually by all crops considered at year  $i$ , for each state;

$Lxc$  is the level of nutrient X exported by culture  $c$ ;

$Qc_i$  is the quantity of crop  $c$  produced at year  $i$ , in each state;

The average levels of exported nutrients, by culture, were selected in the national scientific literature and are presented in Table 2, which shows the average quantity, expressed in kilograms, of exported NPK, per ton produced of each culture.

A estimativa da quantidade total de nutrientes exportados em solos agrícolas foi realizada por meio da somatória do produto entre teor médio do nutriente presente na porção comercial de determinada cultura pela quantidade total de produtos colhidos em cada estado, por ano, como em (4).

$$X_{S_i} = \sum(Txc * Qc_i) \quad (4)$$

Em que:

$X_{S_i}$  é a quantidade do nutriente X exportado anualmente por todas as culturas consideradas no ano  $i$ , para cada estado;

$Txc$  é o teor do nutriente X exportado pela cultura  $c$ ;

$Qc_i$  é a quantidade produzida da cultura  $c$  no ano  $i$ , em cada estado.

Os teores médios de nutrientes exportados, por cultura, foram selecionados na literatura científica nacional e são apresentados na Tabela 2, que dispõe a quantidade média, expressa em quilogramas, de NPK exportados, por tonelada produzida de cada cultura.

**Table 2** - Annual average amount of nutrients exported by the crops considered in this study<sup>1</sup>

**Tabela 2** - Quantidade média anual de nutrientes exportados pelas culturas consideradas neste trabalho<sup>1</sup>

Cultivation	N	P	K
	kg Mg <sup>-1</sup>		
Soybean	51.00	10.00	20.00
Corn	21.22	4.19	14.36
Sugarcane	0.47	0.08	0.96
Coffee	23.90	1.30	19.60
Cotton	28.40	7.40	18.40
Wheat	30.30	4.41	5.00
Rice	12.50	2.20	4.40
Cowpea Beans		2.92	9.52
Common Beans		4.00	15.30
Tobacco	29.00	2.00	36.00
Batata	2.00	0.40	5.35
Orange	1.96	0.44	1.76
Banana	3.78	0.58	15.56
Tomato	2.00	0.30	3.48

<sup>1</sup>In kg of nutrients per Megagram (Mg) of product produced.

Source: Azevedo Junior (2019).

<sup>1</sup>Em kg de nutrientes por Megagrama (Mg) de produto produzido.

Fonte: Azevedo Junior (2019).

In nature, the main primary source of N is the atmosphere, consisting of 78% molecular nitrogen ( $N_2$ ), which is highly stable, so that it is not susceptible to chemical reactions under natural conditions. For the most part, the natural volume of N contributed to the soil occurs through biological fixation (CARMO *et al.*, 2017). Oil crops are mainly responsible for this fixation (CUNHA *et al.*, 2014). In some cases, it is should observe the existence of a positive N balance in the soil, in the post-harvest season, and its availability for the following harvest. In Brazil, the harvested area destined for soybeans, corn, beans and oilseed crops, reached 69% in 2015.

In this present study, it was assumed that all N absorbed by soybeans entered the soil due to the biological fixation (BNF) carried out by the crop itself, which occupied 46% of the area harvested in Brazil in 2015. The excess of N fixed by soybeans is absorbed by second-harvest corn, strategically grown after soybean harvest. It is considered that 74%<sup>4</sup> of N exports by second-harvest corn is due to the BNF of soybeans and not to the fertilizer introduction (KANEKO *et al.*, 2010).

The absorption of N from BNF also occurs in the production of beans. It is estimated that 76% of the N absorbed, on average<sup>5</sup>, by cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) WALP.) is made available via BNF, while 56% of the N absorbed, on average, by common bean (*Phaseolus vulgaris* L.), have the same origin. However, official surveys refer to the sum of cowpea and common bean (IBGE, 2016). Based on that, the mean between the two percentages of N absorption via BNF was adopted for the available data.

BNF is widely used in studies that aim to estimate the N balance in the soil. In China, Chen *et al.* (2016), used only corn and beans. In Portugal, Carmo *et al.* (2017) chose to aggregate the estimate for all legumes and for the utilization of an estimate that 18% of total N exported in the country is due to BNF. In Brazil, Cunha *et al.* (2014) and Cunha *et al.* (2010, 2011) considered soybeans responsible for all N exported by it, 50% for beans and wheat, and 70% for second-harvest of corn.

Na natureza, a principal fonte primária de N é a atmosfera, constituída por 78% de N molecular ( $N_2$ ), fortemente estável, de modo que não é passível de reações químicas em condições naturais. Em sua maior parte, o volume natural de N aportado ao solo ocorre por meio de fixação biológica (CARMO *et al.*, 2017). As culturas oleaginosas são as principais responsáveis por esta fixação (CUNHA *et al.*, 2014). Em alguns casos, pode-se observar a existência de saldo positivo de N no solo, no pós-safra, e sua disponibilidade para a safra seguinte. No Brasil, a área colhida destinada para soja, milho, feijão e culturas oleaginosas, alcançou 69% em 2015.

Neste estudo, assumiu-se que todo o N absorvido pela soja entrou no solo devido à fixação biológica (FBN) realizada pelo próprio cultivo, que ocupou 46% da área colhida no Brasil em 2015. O excedente de N fixado pela soja é absorvido pelo milho de segunda safra, cultivado, estrategicamente, após a colheita da soja. Considera-se que 74%<sup>4</sup> da exportação de N pelo milho safrinha se deve à FBN da soja e não à introdução de fertilizantes (KANEKO *et al.*, 2010).

A absorção de N oriundo da FBN também ocorre na produção do feijão. Estima-se que 76% do N absorvido, em média<sup>5</sup>, pelo feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) WALP.) é disponibilizado via FBN, enquanto 56% do N absorvido, em média, pelo feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), tenha a mesma origem. No entanto, os levantamentos oficiais se referem à somatória do feijão-caupi e do feijão-comum (IBGE, 2016). Por este motivo, a média entre os dois percentuais de absorção de N via FBN foi adotada para os dados disponíveis.

A FBN é amplamente utilizada em trabalhos que objetivam estimar o saldo de N no solo. Na China, Chen *et al.*, (2016) utilizaram somente milho e feijão. Em Portugal, Carmo *et al.* (2017) optaram por agregar a estimativa para todas as leguminosas e a utilização de uma estimativa de que 18% de todo N exportado, no país, se devem à FBN. No Brasil, Cunha *et al.* (2014) e Cunha *et al.* (2010, 2011) consideraram a soja sendo responsável pela totalidade do N por ela exportado, 50% para o feijão e para o trigo e 70% para o milho safrinha.

<sup>4</sup>BNF by soybean leaves a residual of 35 to 45 kg ha<sup>-1</sup> of N and per ha and that mineralization releases, on average, 20 kg of N for each 1% of organic matter in the soil (OMS). Knowing that arable soils have 3% of MOS, 60 kg ha<sup>-1</sup> of N is released. In this way, agricultural soils can supply around 100 kg ha<sup>-1</sup> of N for corn cultivation in succession to soybean (KANEKO *et al.*, 2010). According to the National Supply Company (CONAB, 2016), second-harvest corn has an average yield of 95.3 ha<sup>-1</sup>, productivity that leads to the extraction of approximately 135 kg ha<sup>-1</sup> of N (KANEKO *et al.*, 2010), as 100 kg enters the soil via BNF, 74% of the exported N originates from the BNF made by soybeans.

<sup>5</sup>The average was calculated from the participation of FBN in the development of the two bean varieties in four different periods, 17; 31; 58 and 78 days after sowing, using the Difference Method (BRITO *et al.*, 2009).

<sup>4</sup>A FBN pela soja deixa um residual de 35 a 45 kg ha<sup>-1</sup> de N e que a mineralização libera, em média, 20 kg de N para cada 1% de matéria orgânica do solo (MOS). Sabendo que os solos agricultáveis possuem 3% de MOS, tem-se a liberação de 60 kg ha<sup>-1</sup> de N. Desse modo, solos agrícolas podem fornecer cerca de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N para a cultura do milho em sucessão à soja (KANEKO *et al.*, 2010). Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2016), o milho de segunda safra apresenta rendimento médio de 95,3 sacas por ha, produtividade que leva à extração de aproximadamente 135 kg ha<sup>-1</sup> de N (KANEKO *et al.*, 2010), como 100 kg adentram ao solo via FBN, tem-se que 74% do N exportado é de origem da FBN realizada pela soja.

<sup>5</sup>A média foi calculada a partir da participação da FBN no desenvolvimento das duas variedades de feijão em quatro períodos diferentes, 17; 31; 58 e 78 dias após a semeadura, utilizando o Método da Diferença (BRITO *et al.*, 2009).

Vinasse is the main residue from the sugarcane processing by the ethanol and sugar plants and holds a significant concentration of nutrients, such as K (OLIVEIRA *et al.*, 2010). Due to this characteristic, vinasse has been used to fertigate the sugarcane plantations close to the plants, enabling a reduction in the consumption of potassium fertilizers. Thus, Cunha *et al.* (2014, 2018), it was adopted that 20% of the K exported by this crop originates from the application of vinasse. In the same sense, but related to N, Chen *et al.*, (2016), used fertigation as a source of nutrients in China.

National and state consumption of fertilizers and nutrients in Brazil is calculated and made available annually by the Brazilian National Fertilizer Association (Portuguese acronym, ANDA). The total amount of nutrients added to the soil results, for each state, from the sum of BNF with nitrogen fertilizers, for N (5), the use of vinasse and the application of potassium fertilizers, for K (6) and the total of fertilizers phosphate for P (7). From this, the equations (1), (2), and (3) can be calculated.

$$Ne_i = BNF_i - QN_i \quad (5)$$

$$Ke_i = V_i - QK_i \quad (6)$$

$$Pe_i = QP_i \quad (7)$$

In which:

$QN_i$ ,  $QK_i$  and  $QP_i$  are the quantities of N, K and P delivered, at year  $i$ ;

$BNF_i$  is the amount of N biologically fixed by soybean, corn, and beans, at year  $i$ ;

$V_i$  is the amount of K introduced into the soil by the fertigation of sugarcane with vinasse, at year  $i$ .

Although approached in the international context, the inflows and outflows originated from the recycling of urban and rural nutrients and weathering, besides physical degradation and gas loss, were not employed in any of the national works, due to the distinction of objectives. While Brazilian researches intend to capture the consequences of precision agriculture, in China, the analysis was directed to the entire national soil. In Portugal, a study compared agricultural production based on the use of inorganic fertilizers with the previous period, concerning the increased use of organic fertilizers. Macdonald *et al.* (2011) and Vitousek *et al.* (2009), compared international studies, regardless of the flows considered.

A vinhaça é o principal resíduo do beneficiamento da cana-de-açúcar pelas usinas de etanol e açúcar e possui significativa concentração de nutrientes, dentre os quais se destaca o K (OLIVEIRA *et al.*, 2010). Devido a esta característica, a vinhaça é utilizada para fertirrigar as plantações de cana-de-açúcar próximas às usinas, permitindo a redução do consumo de fertilizantes potássicos. Assim como Cunha *et al.* (2014, 2018), adotou-se que 20% do K exportado por essa cultura se origina da aplicação da vinhaça. No mesmo sentido, mas relativo ao N, Chen *et al.*, (2016) utilizaram a fertirrigação como fonte de nutrientes, na China.

O consumo nacional e estadual de fertilizantes e nutrientes no Brasil é calculado e disponibilizado, anualmente, pela Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA). A totalidade de nutrientes adicionados ao solo resulta, para cada estado, da soma da FBN com os fertilizantes nitrogenados, para o N (5), do uso da vinhaça e aplicação de fertilizantes potássicos, para o K (6) e do total de fertilizantes fosfatados para o P (7). Pode-se, a partir disso, calcular as equações (1), (2) e (3).

$$Ne_i = FBN_i - QN_i \quad (5)$$

$$Ke_i = V_i - QK_i \quad (6)$$

$$Pe_i = QP_i \quad (7)$$

Em que:

$QN_i$ ,  $QK_i$  e  $QP_i$  são as quantidades de N, K e P entregues, no ano  $i$ ;

$FBN_i$  é a quantidade de N fixada biologicamente pelas culturas da soja, do milho e do feijão, no ano  $i$ ;

$V_i$  é a quantidade de K introduzido no solo pela fertirrigação da cana-de-açúcar com a vinhaça, no ano  $i$ .

Embora abordados no contexto internacional, os fluxos de entrada e de saída originados da reciclagem de nutrientes urbanos e rurais e do intemperismo, além da degradação física e da perda gasosa, não foram utilizados em nenhum dos trabalhos nacionais, devido à distinção dos objetivos. Enquanto as pesquisas brasileiras têm como objetivo captar as consequências da agricultura de precisão, na China a análise foi direcionada à totalidade do solo nacional. Em Portugal, o estudo comparou a produção agrícola baseada no uso de fertilizantes inorgânicos com o período anterior, quando do uso acentuado de adubos orgânicos. Macdonald *et al.* (2011) e Vitousek *et al.* (2009) compararam estudos internacionais, não se importando com os fluxos considerados.



## Monetary Soil Nutrient Balance

The balance of nutrients in the soil allows the physical flow of NPK to be measured from specific parameters of each analyzed crop (VITOUSEK *et al.*, 2009). The annual balance, which results from the Balance Sheet, enables inferences about the soil efficiency as to fixed assets for agricultural production. Through crop progression, the soil tends to lose nutrients that are absorbed by plants and exported through its commercial portion. Exportation, therefore, prompts a reduction in soil fertility, resulting in the depreciation of this asset for the following productive cycles. The introduction of new amounts of nutrients is necessary to restore the total production capacity.

Therefore, there is a direct relationship between the agricultural production intensity and the chemical depletion of the soil, in which agriculture could cause greater or lesser chemical wear, according to the production intensity. Here, it is considered the current stage of technological development, regarding the genetic improvement that allows a greater response to fertilization.

The balance of nutrients, therefore, allows measuring, in monetary terms, the depreciation value of the soil, by spending on the acquisition of inorganic fertilizers responsible for recovering the fertility of soils, ensuring maximum efficiency. The Monetary Balance of Soil Nutrients is calculated according to (8).

$$MBSN_i = Pfe_i * PBSN_i \quad (8)$$

In which:

$MBSN_i$  is the Monetary Balance of Soil Nutrients, at year  $i$ , for each state;

$Pfe_i$  is the national average price per ton of inorganic fertilizer, at year  $i$ ;

$PBSN_i$  is the Physical Balance of Soil Nutrients, at year  $i$ , for each state.

The MBSN was calculated individually for NPK and its compositions. Equations (1) to (3) describe how the PBSN was calculated. After obtaining the Nutrient Monetary Balance for each state, the descriptive statistics of the information were carried out to compare the results with the available theoretical literature.

## RESULTS AND DISCUSSIONS

Estimated for the years 2005 and 2015, the balance of the soil nutrients allowed accounting the NPK balance, for the states of Goiás (GO), Mato Grosso (MT), Minas Gerais (MG), Paraná (PR), Rio Grande do Sul (RS), and São Paulo (SP). In 2005, these Federation Units concentrated 71% of the demand for fertilizers (ANDA, 2016) and 70% of the entire cultivated area in Brazil. In 2015, fertilizer consumption rose to 72%, and the volume of cultivated land was 73% of the national amount (IBGE, 2017).

## Saldo monetário de nutrientes no solo

O balanço de nutrientes no solo permite que o fluxo físico de NPK seja mensurado a partir de parâmetros específicos de cada cultivo analisado (VITOUSEK *et al.*, 2009). O saldo anual, que resulta do Balanço, viabiliza a realização de inferências acerca da eficiência do solo quanto ao ativo imobilizado para a produção agrícola. Safra após safra, o solo tende a perder nutrientes que são absorvidos pelas plantas e exportados por meio de sua porção comercial. A exportação, portanto, causa a redução da fertilidade do solo, resultando na depreciação deste ativo para os ciclos produtivos seguintes. A introdução de novas quantidades de nutrientes é necessária para o restabelecimento da capacidade total de produção.

Portanto, tem-se uma relação direta entre a intensidade da produção agrícola e a depleção química do solo, em que a agricultura poderia provocar maior ou menor desgaste químico, de acordo com a intensidade da produção. Considera-se, aqui, o estágio atual de desenvolvimento tecnológico, quanto ao melhoramento genético que permite maior resposta à fertilização.

O saldo de nutrientes permite, portanto, mensurar, monetariamente, o valor da depreciação do solo, por meio do dispêndio com a aquisição de fertilizantes inorgânicos responsáveis por recuperar a fertilidade do solo, garantindo sua máxima eficiência. O Saldo Monetário de Nutrientes do Solo é calculado conforme (8).

$$SMNS_i = Pfe_i * SFNS_i \quad (8)$$

Em que:

$SMNS_i$  é o Saldo Monetário de Nutrientes do Solo, no ano  $i$ , para cada estado;

$Pfe_i$  é o preço médio nacional por tonelada do fertilizante inorgânico, no ano  $i$ ;

$SFNS_i$  é o Saldo Físico de Nutrientes do Solo, no ano  $i$ , para cada estado.

O  $SMNS$  foi calculado individualmente para NPK e suas composições. As equações de (1) a (3) descrevem como o  $SFNS$  foi calculado. Após obter o Saldo Monetário de Nutrientes para cada estado, realizou-se a estatística descritiva das informações com a finalidade de comparar os resultados com a literatura teórica disponível.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estimado para os anos de 2005 e 2015, o balanço de nutrientes do solo permitiu contabilizar o saldo de NPK, para os estados de Goiás (GO), Mato Grosso (MT), Minas Gerais (MG), Paraná (PR), Rio Grande do Sul (RS) e São Paulo (SP). Em 2005, essas Unidades da Federação concentraram 71% da demanda por fertilizantes (ANDA, 2016) e 70% de toda a área cultivada no Brasil. Em 2015, o consumo de fertilizante subiu para 72% e o volume de terra cultivada foi a 73% do montante nacional (IBGE, 2017).

In 2005, Physical Balance of Soil Nutrients (PBSN), for the analyzed states, was positive and reached a total volume of 48.27 million tons, Mato Grosso (41%), Paraná (23%), and Goiás (16%) getting the highest balances. The balance of N represents more than 82% of the state balances of NPK, reaching 97% in MT and PR, revealing that this is the most important nutrient for the nutrients balance in these states. In that same year, Mato Grosso head the balance of N and P, but its balance for K was lower than the results for Minas Gerais, Rio Grande do Sul, and São Paulo, even having recorded the highest volumes input and output of K (Table 3).

Moreover, in 2015, positive balances were obtained for the Federal Units under study, with the three highest being registered for Mato Grosso (39%), Paraná (24%), and Rio Grande do Sul (15%). The N represented at least 90% of the NPK balance of the states. Likewise, in 2005, the greatest excesses in N and P were recorded for Mato Grosso, which in that year was second only to Minas Gerais in terms of the K balance. Concerning this nutrient, there was a negative balance of 1,361.27 tons in Paraná (Table 3).

Em 2005, o Saldo Físico de Nutrientes do Solo (SFNS), para os estados analisados, foi positivo e alcançou o volume total de 48,27 milhões de toneladas, tendo Mato Grosso (41%), Paraná (23%) e Goiás (16%) os maiores saldos. O saldo do N representa mais de 82% dos saldos estaduais de NPK, chegando a 97% em MT e PR, revelando ser este o nutriente de maior importância para o balanço de nutrientes, nesses estados. Nesse mesmo ano, Mato Grosso liderou o saldo de N e P, porém seu saldo para o K foi inferior aos resultados de Minas Gerais, Rio Grande do Sul e São Paulo, mesmo tendo registrado os maiores volumes de entrada e saída de K (Tabela 3).

Para 2015, também foram obtidos saldos positivos para todas as unidades federativas em estudo, sendo que os três maiores foram registrados para Mato Grosso (39%), Paraná (24%) e Rio Grande do Sul (15%). O N representou, pelo menos, 90% do saldo de NPK dos estados. Assim como em 2005, os maiores excedentes do N e P foram contabilizados para Mato Grosso, que nesse ano ficou atrás somente de Minas Gerais no que tange ao saldo do K. Em relação a esse nutriente, ocorreu um saldo negativo de 1.361,27 toneladas no Paraná (Tabela 3).

**Table 3** - Physical balance of NPK in the selected states in the years 2005 and 2015<sup>1</sup>

**Tabela 3** - Balanço físico de NPK nos estados selecionados nos anos de 2005 e 2015<sup>1</sup>

State	Nitrogen			Phosphorus			Potassium			PBSN <sup>4</sup>
	Input <sup>2</sup>	Output	Balance	Input	Output	Balance	Input <sup>3</sup>	Output	Balance	
<b>2005</b>										
GO	7.77	0.45	7.32	0.30	0.09	0.21	0.28	0.21	0.06	7.59
MT	20.12	1.06	19.06	0.60	0.21	0.39	0.66	0.46	0.20	19.66
MG	3.81	0.35	3.46	0.34	0.06	0.28	0.45	0.22	0.24	3.98
PR	11.55	0.79	10.76	0.42	0.15	0.27	0.44	0.38	0.06	11.09
RS	2.72	0.29	2.43	0.33	0.05	0.28	0.37	0.13	0.24	2.95
SP	2.89	0.35	2.54	0.32	0.07	0.25	0.60	0.40	0.21	3.00
<b>Total</b>	<b>48.87</b>	<b>3.30</b>	<b>45.58</b>	<b>2.31</b>	<b>0.63</b>	<b>1.68</b>	<b>2.80</b>	<b>1.80</b>	<b>1.01</b>	<b>48.27</b>
<b>2015</b>										
GO	14.56	0.68	13.87	0.51	0.13	0.37	0.52	0.39	0.14	14.38
MT	43.50	1.95	41.54	0.88	0.39	0.50	1.12	0.92	0.19	42.23
MG	5.46	0.42	5.04	0.40	0.08	0.33	0.53	0.29	0.24	5.61
PR	26.39	1.38	25.01	0.63	0.26	0.37	0.66	0.66	-0.001	25.39
RS	16.24	1.10	15.14	0.59	0.21	0.38	0.64	0.47	0.17	15.69
SP	4.50	0.47	4.03	0.36	0.08	0.27	0.61	0.57	0.04	4.35
<b>Total</b>	<b>110.65</b>	<b>6.00</b>	<b>104.64</b>	<b>3.38</b>	<b>1.15</b>	<b>2.22</b>	<b>4.09</b>	<b>3.31</b>	<b>0.78</b>	<b>107.65</b>

<sup>1</sup>In millions of tons. <sup>2</sup>Result of the sum of the input through the application of fertilizers and the Biological Fixation of soybeans. <sup>3</sup>Result of the sum of the input through the application of fertilizers and the use of vinasse for fertigation in the cultivation of sugarcane. <sup>4</sup>Physical Balance of Soil Nutrients.

<sup>1</sup>Em milhões de toneladas. <sup>2</sup>Resultado da soma da entrada por meio da aplicação de fertilizantes e da Fixação Biológica da soja. <sup>3</sup>Resultado da soma da entrada por meio da aplicação de fertilizantes e do uso da vinhaça para fertirrigação no cultivo de cana-de-açúcar. <sup>4</sup>Saldo Físico de Nutrientes do Solo.

The comparative analysis between the years reveals a 55% increase in the total NPK balance. Among the states, Rio Grande do Sul showed a greater increase, about 81%, followed by Paraná (56%) and Mato Grosso (53%). These three federative units, in addition to São Paulo, increased the surplus of N and P and reduced that of K. In Goiás and Mato Grosso, however, the increase occurred in the balance of the three nutrients (Table 3).

The increase in the total NPK balance may be justified by the expansion of the planted area and its destination. The area destined for agricultural production between 2005 and 2015 was risen by 22% (IBGE, 2017), increasing the inflow and outflow of nutrients from the soil under cultivation. There are also changes in the total area destined for each crop, that in this period, they were expanded to the production of soybean and corn by 3%, in the states of Paraná and Rio Grande do Sul, and by 9% in the state of Mato Grosso, while in the states of São Paulo, Minas Gerais, and Goiás have been reduced in 10, 3, and 2%, respectively.

Soybean and corn are among the largest exporters of NPK (Table 2), regarding the studied crops. The expansion in the area destined for the cultivation of these vegetables tends to increase the outflow of these nutrients and lead the farmer to apply more fertilizers. In the states of Mato Grosso, Paraná, and Rio Grande do Sul, the expansion of corn and soybean crops pointed to an increase in the application of fertilizers - and BNF - compatible with the growth in exports of N and P, but incompatible with the variation in K. On the other hand, in the state of São Paulo, the increase in the area destined to the cultivation of sugarcane (IBGE, 2017) increased the export of K by 30% and inflow by only 1% (Table 3), resulting in a reduction the balance of that nutrient.

However, in the state of Goiás, the areas that were expanded under sugarcane cultivation and reduced for corn and soybeans cultivation (IBGE, 2017) did not result in a nutritional deficit because the nutrient inputs were higher than the increases registered for exports (Table 3). In Minas Gerais, in addition to the expansion of the area for the cultivation of sugar cane, there is a significant area cultivated with coffee that also requires N and P, in higher proportion (IBGE, 2017).

The existence of a positive NPK balance, in the states assessed, in both years, indicates that the soil did not suffer nutritional depreciation. Similar results were found by Cunha *et al.* (2010) and by Cunha *et al.* (2018), who concluded through the surplus between input and output of macro and micronutrients, in the soils of the Brazilian states, for the years 2008 and 2013 to 2016, respectively.

A análise comparativa entre os anos revela um aumento de 55% no saldo total de NPK. Entre os estados, o Rio Grande do Sul apresentou maior aumento, cerca de 81%, seguido de Paraná (56%) e Mato Grosso (53%). Essas três unidades federativas, além de São Paulo, ampliaram o excedente de N e P e reduziram o de K. Em Goiás e Mato Grosso, no entanto, a ampliação ocorreu no saldo dos três nutrientes (Tabela 3).

A ampliação do saldo total de NPK pode ser justificada pelo aumento da área plantada e na sua destinação. A área destinada à produção agrícola entre 2005 e 2015 foi acrescida em 22% (IBGE, 2017), elevando os fluxos de entrada e saída de nutrientes do solo sob cultivo. Tem-se ainda, a alteração da área total destinada para cada cultivo que neste período foi ampliada para a produção de soja e milho em 3%, nos estados de Paraná e Rio Grande do Sul, em 9% no estado de Mato Grosso e reduzida em 10; 3 e 2% nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, respectivamente.

A soja e o milho estão entre os maiores exportadores de NPK (Tabela 2), entre as culturas estudadas. Desse modo, o aumento da área destinada ao cultivo desses vegetais tende a ampliar os fluxos de saída desses nutrientes e levar o agricultor a aplicar mais fertilizantes. Nos estados de Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul, a ampliação dos cultivos de milho e soja levou ao aumento da aplicação de fertilizantes – e da FBN – compatíveis com o aumento das exportações de N e P, mas incompatíveis com a variação do K. No estado de São Paulo, por sua vez, o aumento da área destinada ao cultivo de cana-de-açúcar (IBGE, 2017) ampliou a exportação de K em 30% e entrada em apenas 1% (Tabela 3), resultando na redução do saldo desse nutriente.

No estado de Goiás, a ampliação da área sob cultivo de cana-de-açúcar e redução da área de milho e soja (IBGE, 2017) não resultaram em déficit nutricional pois as entradas de nutrientes foram superiores às elevações registradas para as exportações (Tabela 3). Em Minas Gerais, além da ampliação da área destinada ao cultivo de cana-de-açúcar, tem-se significativa área cultivada com café que também demanda N e P, em maior proporção (IBGE, 2017).

A existência de saldo positivo de NPK, em todos os estados, nos dois anos, indica que o solo não sofreu depreciação nutritiva. Resultados semelhantes foram encontrados por Cunha *et al.* (2010) e por Cunha *et al.* (2018), que concluíram pelo superávit entre entrada e saída de macro e micronutrientes, nos solos dos estados brasileiros, para os anos de 2008 e de 2013 a 2016, respectivamente.

Nevertheless, the breakdown of data by nutrient indicates the existence of nutritional depreciation of K in the agricultural soil of Paraná in 2015 (Table 3). This result was also identified by Cunha *et al.* (2014), that when measuring the flows of N, P, and K, between 2009 and 2012, found surpluses for all states, except for the K, which had a deficit of 136 thousand tons in Paraná.

The international literature has registered different results, for instance, in Portugal, Carmo *et al.* (2017) concluded that the existence of an excess of N only occurred after inorganic fertilizers popularized, whereas the positive balance of K and P were already present, even before this popularization. Additionally, analyzing published researches in East Africa, Cobo *et al.* (2010) found a negative balance due to potential soil exploitation problems.

In China, Chen *et al.* (2016) and Sheldrick *et al.* (2003) found increasing depletion that culminated in 8.2 million tons in 1997. These studies point to agricultural production as the main responsible for this deficit, since this activity exported about 270% of the total K introduced into the soil via inorganic fertilizers; on the other hand, agricultural production would also have contributed to the subsequent recovery from soil depreciation through the introduction of nitrogen fertilizers. When comparing agronomic flows of P among several countries, MacDonald *et al.* (2011) found significant excesses in East Asia, Western and Southern Europe, on the American coast, and southern Brazil, aside from significant deficits in Argentina, Paraguay, Northern United States, and Eastern Europe.

The deficits found in this study and on the cited literature, evidence the depreciation of the soil caused by agricultural production; however, the positive balance in expressive volume can produce undesirable financial and environmental effects.

The nutrients, when excess, tend to get involved in physical and chemical reactions in the soil that make them unavailable for plant absorption (ALLEONI *et al.*, 2016). The excess of N and P can favor the leaching of these elements, which, if reaching rivers and lakes, may cause eutrophication (VITOUSEK *et al.*, 2009). Also, a high K content can increase the soil salinity, intensifying its desertification (PEDROTTI *et al.*, 2015). It is important to mention, the high content of some nutrients can induce inhibition of the absorption of others, as is the case of the Zn inhibition caused by the excess of P (SANTOS, 2018).

Entretanto, a discriminação dos dados por nutriente indica a existência de depreciação nutritiva do K no solo agrícola paranaense em 2015 (Tabela 3). Esse resultado também foi identificado por Cunha *et al.* (2014), que ao mensurarem os fluxos de N, P e K, entre 2009 e 2012, constataram excedentes para todos os estados, a exceção do K que apresentou déficit de 136 mil toneladas no Paraná.

A literatura internacional tem registrado resultados distintos. Em Portugal, Carmo *et al.* (2017) concluíram que a existência de excedente do N só ocorreu após a popularização dos fertilizantes inorgânicos, ao passo que o saldo positivo do K e P já estavam presentes, mesmo antes dessa popularização. Ao analisar trabalhos publicados sobre a África Oriental, Cobo *et al.* (2010) encontraram balanços negativos em virtude de potenciais problemas de exploração do solo.

Na China, Chen *et al.* (2016) e Sheldrick *et al.* (2003) encontraram depleção crescente que culminou em 8,2 milhões de toneladas em 1997. Esses estudos apontam a produção agrícola como principal responsável por esse déficit, uma vez que essa atividade exportou cerca de 270% do total de K introduzido no solo via fertilizantes inorgânicos; por outro lado, a produção agrícola também teria contribuído para a posterior recuperação da depreciação do solo por meio da introdução de fertilizantes nitrogenados. Ao comparar os fluxos agrônômicos de P entre diversos países, MacDonald *et al.* (2011) encontraram significativos excedentes no Leste da Ásia, no Oeste e Sul da Europa, na costa americana e no Sul do Brasil, além de déficits expressivos na Argentina, Paraguai, Norte dos Estados Unidos e Europa Oriental.

Os déficits encontrados nesse trabalho e na literatura citada, evidenciam a depreciação do solo causada pela produção agrícola, entretanto, o saldo positivo em volume expressivo pode produzir efeitos financeiros e ambientais indesejáveis.

Os nutrientes, em excesso, tendem a se envolver em reações físicas e químicas no solo que os deixam indisponíveis para a absorção das plantas (ALLEONI *et al.*, 2016). O excesso de N e de P pode favorecer a lixiviação desses elementos, que ao atingirem rios e lagos provocam a eutrofização (VITOUSEK *et al.*, 2009), e o elevado teor de K pode aumentar a salinidade do solo, intensificando a sua desertificação (PEDROTTI *et al.*, 2015). O elevado teor de alguns nutrientes pode provocar a inibição da absorção de outros, como é o caso da inibição de Zn causada pelo excesso de P (SANTOS, 2018).

As it is possible to observe, both the negative and the positive balance may represent losses to the rural producer. The significant positive balance can intensify leaching or cause changes in the soil-plant system, hindering the development of cultivars, thus, making the production process more expensive. The negative balance means a reduction in the value of the agricultural property since the soil would have nutrients available below the optimum, causing productive inefficiency. In both cases, the value, in monetary units, of the nutrient balance is required in order to estimate the financial impact of the nutrient balance.

The average price per ton of NPK, in 2005 and 2015, respectively, was R\$ 1,828.12 and R\$ 1,755.82. Figure 1 shows the monetary balance of nutrients, for the six Brazilian states, in the two years under study. It seems that Mato Grosso had a greater monetary balance in the two years, R\$ 35,932.77 in 2005 and R\$ 74,155.04 in 2015, in addition to the higher absolute increase, R\$ 38,222.28. Though, the highest relative increase was registered for the state of Rio Grande do Sul, about a 412% increase, culminating in R\$ 27,542.39 in 2015. Minas Gerais and São Paulo had an enhanced balance of 26 and 28%, respectively, and were the states with the lowest monetary balance.

Como é possível observar, tanto o saldo negativo quanto o positivo podem representar perdas ao produtor rural. O saldo positivo expressivo pode intensificar a lixiviação ou provocar alterações no sistema solo-planta que dificultam o desenvolvimento das cultivares, encarecendo o processo produtivo. O saldo negativo significa redução do valor da propriedade agrícola, uma vez que o solo estaria com disponibilidade de nutrientes abaixo do ótimo, ocasionando a ineficiência produtiva. Nos dois casos, necessita-se do valor, em unidades monetárias, do saldo de nutrientes a fim de se estimar o impacto financeiro do saldo de nutrientes.

O preço médio da tonelada de NPK, em 2005 e 2015, respectivamente, foi de R\$ 1.828,12 e de R\$ 1.755,82. A Figura 1 dispõe o saldo monetário de nutrientes, para os seis estados brasileiros, nos dois anos em estudo. Verifica-se que Mato Grosso apresentou o maior saldo monetário nos dois anos, foram R\$ 35.932,77 em 2005 e R\$ 74.155,04 em 2015, além do maior aumento absoluto, R\$ 38.222,28. A maior elevação relativa foi registrada para o estado do Rio Grande do Sul, cerca de 412% de aumento, culminando em R\$ 27.542,39 em 2015. Minas Gerais e São Paulo tiveram saldo ampliado em 26 e 28%, respectivamente, e foram os estados com menor saldo monetário.

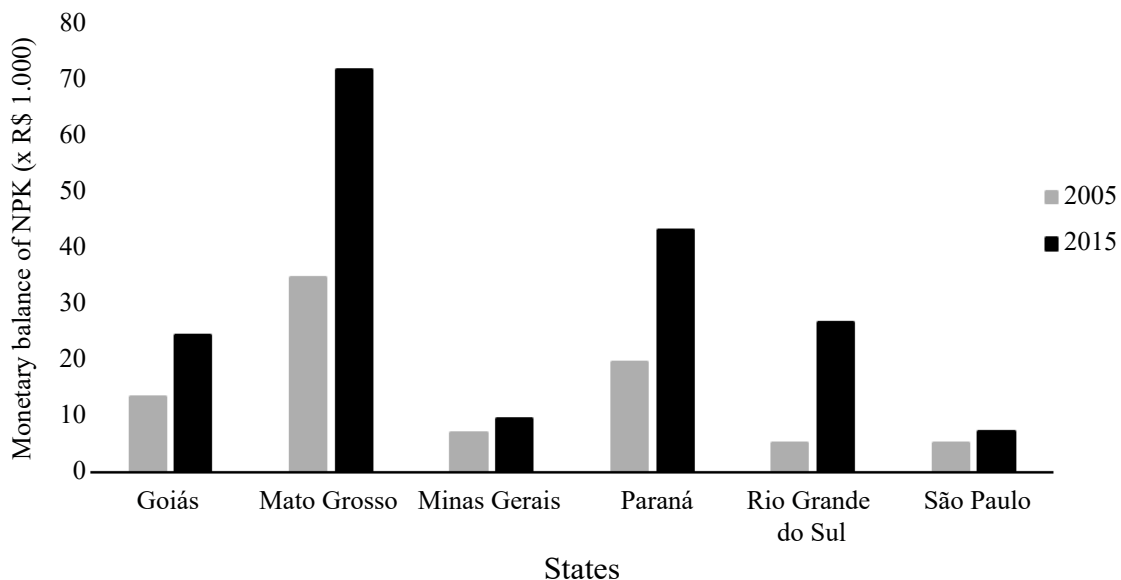


Figure 1 - Monetary balance\* of NPK, for the Federated Units studied, in the years 2005 and 2015.

\*Price of NPK obtained through the average price of simple superphosphate, urea, and potassium chloride, weighted by the average participation of each nutrient in the final formulation of the fertilizer.

*Figura 1 - Saldo monetário\* de NPK, para as unidades federativas estudadas, nos anos de 2005 e 2015.*

*\*Preço de NPK obtido por meio da média de preços do superfosfato simples, da ureia e do cloreto de potássio, ponderada pela participação média de cada nutriente na formulação final do fertilizante.*

In brief, the expansion in the total planted area implied in an increase in the physical flows of NPK in the six states, but the expansion of the total area destined for the cultivation of corn and soybeans, in the states of Mato Grosso, Paraná, and Rio Grande do Sul, potentialized the increase physical flows. As a result, there are positive balances (Table 3).

When monetized, these flows were presented as costs of R\$ 61,592.99 in 2005, for Mato Grosso (R\$ 35,932.77), Paraná (R\$ 20,275.72), and Rio Grande do Sul (R\$ 5,384.50); while in 2015, the costs were R\$ 146,271.01, for Mato Grosso (R\$ 74,155.04); Paraná (R\$ 44,573.57), and Rio Grande do Sul (R\$ 27,542.39). These states had higher unnecessary costs than those observed in São Paulo, with elevated sugarcane production, and Minas Gerais, for high coffee production. In Goiás, there is an important production of soy, corn, and sugarcane.

## CONCLUSIONS

Agricultural production intensified nutrient flows between 2005 and 2015 in the six states studied; however, there was no nutritional depreciation concerning the three nutrients jointly. The P presented a negative balance, in 2015, in the state of Paraná;

The dynamics of the destination of the area under cultivation was decisive in determining the differences in monetary balances between the states. States that exhibited an expansion in areas destined to the cultivation of soybean and corn received an accretion in their balances higher compared to those that had a reduction in this area.

Em síntese, o aumento da área total plantada provocou ampliação dos fluxos físicos de NPK nos seis estados, mas a ampliação da área total destinada ao cultivo de milho e soja, nos estados de Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul, potencializou o aumento dos fluxos físicos. Como resultado, tem-se saldos positivos (Tabela 3).

Ao serem monetizados, esses fluxos se apresentam como custos de R\$ 61.592,99 em 2005 - sendo R\$ 35.932,77, para Mato Grosso; R\$ 20.275,72 para o Paraná e R\$ 5.384,50 para o Rio Grande do Sul - e de R\$ 146.271,01 em 2015 - sendo R\$ 74.155,04, para Mato Grosso; R\$ 44.573,57 para o Paraná e R\$ 27.542,39 para o Rio Grande do Sul. Esses estados apresentaram custos desnecessários mais elevados que aqueles observados em São Paulo, com elevada produção de cana-de-açúcar, e Minas Gerais, pela alta produção de café. Em Goiás, tem-se importante produção de soja, milho e cana-de-açúcar.

## CONCLUSÕES

A produção agrícola intensificou os fluxos de nutrientes, entre 2005 e 2015, nos seis estados estudados, entretanto, não houve depreciação nutritiva no que se refere aos três nutrientes em conjunto. O P apresentou saldo negativo, em 2015, no estado do Paraná;

A dinâmica da destinação da área sob cultivo foi decisiva na determinação das diferenças nos saldos monetários, entre os estados. Os estados que apresentaram aumento da área destinada ao cultivo de soja e milho obtiveram aumento do saldo superior àqueles que apresentaram redução dessa área.

## CITED SCIENTIFIC LITERATURE

- ALLEONI, L. R. F.; MELLO, J. W. V.; ROCHA, W. S. D. R. Eletroquímica, Adsorção e troca iônica no solo. *In: ALLEONI, L. R. F.; MELO, V. F. (eds.). Química e Mineralogia do Solo - Parte 2*. 1ª. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016. p. 70-123.
- ANDA. Anuário Estatístico do Setor de Fertilizantes, 2015. São Paulo, p. 178, 2016.
- ANDRADE, J. C. Conceitos Básicos de Química. *In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (eds.). Química e Mineralogia do Solo*, v. 1. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016. p. 695.
- AZEVEDO JUNIOR, W. C. **Balço de nutrientes e sua inclusão no produto interno bruto do Brasil ajustado pela depreciação do solo agrícola**. Tese (Doutorado em Ciência do Desenvolvimento Socioambiental) - Núcleo de Altos Estudos, Amazônicos Universidade Federal do Pará, Belém, 117 p. 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11238>.
- BRITO, M. M. P.; MURAOKA, T.; SILVA, E. C. Marcha de Absorção do Nitrogênio do Solo, do Fertilizante e da Fixação Simbiótica em Feijão-Caupi (*Vigna unguiculata* (L.) walp.) e Feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) Determinada com uso de N. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, n. 4, p. 559-565, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000200004>
- CARMO, M.; GARCÍA-RUIZ, R.; FERREIRA, M. I.; DOMINGOS, T. The N-P-K soil nutrient balance of Portuguese cropland in the 1950s: The transition from organic to chemical fertilization. *Scientific Reports*, v. 7, n. 1, p. 1-14, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08118-3>.
- CERRETELLI, S.; POGGIO, L.; GIMONA, A.; YAKOB, G.; BOKE, S.; HABTE, M.; COULL, M.; PERESSOTTI, A.; BLACK, H. Spatial assessment of land degradation through key ecosystem services: The role of globally available data. *Science of The Total Environment*, v. 628-629, p. 539-555, 2018. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.085>.
- CHEN, M.; SUN, F.; SHINDO, J. China's agricultural nitrogen flows in 2011: Environmental assessment and management scenarios. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 111, p. 10-27, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.026>.
- COBO, J. G.; DERCON, G.; CADISCH, G. Nutrient balances in African land use systems across different spatial scales: A review of approaches, challenges and progress. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 136, n. 1-2, p. 1-15, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.11.006>.
- CONAB, C. N. A. Série Histórica de Produção - Milho 1ª e 2ª safras. 2016.
- CUNHA, J. F.; FRANCISCO, E. A. B.; CASARIN, V.; PROCHNOW, L. I. Balço de Nutrientes na Agricultura Brasileira - 2009 a 2012. *Informações Agronômicas*, p. 1-13, 2014.
- CUNHA, J. F.; FRANCISCO, E. A. B.; PROCHNOW, L. I. Balço na agricultura brasileira no período de 2013 a 2016. *Informações Agronômicas*, n. 162, p. 3-14, 2018.
- CUNHA, J. F.; CASARIN, V.; PROCHNOW, L. I. Balço de Nutrientes na Agricultura Brasileira. *Informações Agronômicas*, n. 130, p. 1-11, 2010.
- CUNHA, J. F.; CASARIN, V.; PROCHNOW, L. I. Balço de Nutrientes na Agricultura Brasileira no Período de 1988 a 2010. *Informações Agronômicas*, n. 19, p. 1-7, 2011.
- FEIJÓ, C. A.; RAMOS, R. L. O. **Contabilidade Social - A Nova Referência das Contas Nacionais do Brasil**. 4ª. Rio de Janeiro: Campus, 2017.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção Agrícola Municipal, 2015. Rio de Janeiro, 2016. .
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção Agrícola Municipal, 2017. 2017. **Série Histórica das culturas temporárias e permanentes 1974-2016**. Available at: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>. Accessed on: 28 Dec. 2018.
- KANEKO, F. H.; ARF, O.; GITTI, D. D. E. C.; ARF, M. V.; CHIODEROLI, C. A.; KAPPES, C. Manejo do Solo e do Nitrogênio em Milho Cultivado em Espaçamentos Reduzido e Tradicional. *Bragantia*, v. 69, n. 3, p. 677-686, 2010. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000300020>

MACDONALD, G. K.; BENNETT, E. M.; POTTER, P. A.; RAMANKUTTY, N. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 7, p. 3086-3091, 2011. DOI: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1010808108>

MOLINA, M. G.; GARCÍA-RUIZ, R.; FERNÁNDEZ, D. S.; CASADO, G. G.; CID, A.; AMATE, J. I. Nutrient balances and management of soil fertility prior to the arrival of chemical fertilizers in Andalusia, southern Spain. **Human Ecology Review**, v. 21, n. 2, p. 23-48, 2015. DOI: <https://doi.org/10.22459/HER.21.02.2015.02>

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I.; FREIRE, M. B. G. S.; NETO, D. E. S.; SILVA, S. A. M. Extração e Exportação de Nutrientes por Variedade de Cana-de-Açúcar Cultivadas Sob Irrigação Plena. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1343-1352, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400031>

ONU, O. N. U. **System of Environmental-Economic Accounting 2012: Central Framework**. Nova York: United Nations, 2014. DOI: <https://doi.org/ST/ESA/STAT/Ser.F/109>.

PEDROTTI, A.; CHAGAS, R. M.; RAMOS, V. C.; PRATA, A. P. N.; LUCAS, A. A. T.; SANTOS, P. B. Causes and consequences of the process of soil salinization. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 1308-1324, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5902/2236117016544>

SANTOS, E. F. **Mecanismos de interação fósforo-zinco no sistema solo-planta: disponibilidade no solo, avaliações fisiológicas e expressão de transportadores de fosfato**. 2018. 124 f. Universidade de São Paulo, 2018. Available at: [https://teses.usp.br/teses/disponiveis/64/64133/tde-24042018-114304/publico/Elcio\\_Ferreira\\_dos\\_Santos\\_Revisada.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/64/64133/tde-24042018-114304/publico/Elcio_Ferreira_dos_Santos_Revisada.pdf).

SHELDRIK, W. F.; SYERS, J. K.; LINGARD, J. Soil nutrient audits for China to estimate nutrient balances and output/input relationships. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 94, n. 3, p. 341-354, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00038-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00038-5)

VITOUSEK, P. M.; NAYLOR, R.; CREWS, T.; DAVID, M. B.; DRINKWATER, L. E.; HOLLAND, E.; JOHNES, P. J.; KATZENBERGER, J.; MARTINELLI, L. A.; MATSON, P. A.; NZIGUHEBA, G.; OJIMA, D.; PALM, C. A.; ROBERTSON, G. P.; SANCHEZ, P. A.; TOWNSEND, A. R.; ZHANG, F. S. Nutrient Imbalances in Agricultural Development. **Science**, v. 324, n. 5934, p. 1519-1520, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1170261>