



## Revisión (Review)

**SISTEMAS DE FERTILIZACIÓN EN GARBANZO (*Cicer arietinum* L.)  
EN SUELOS DE ZONAS ARIDAS-DESÉRTICAS †**
**[FERTILIZATION SYSTEMS IN CHICKPEA (*Cicer arietinum* L.) IN  
SOILS OF ARID-DESERTIC AREAS]**

**A. Echevarría-Hernández<sup>1</sup>, F. J. Wong-Corral<sup>1</sup>, J. Borboa-Flores<sup>1</sup>,  
F. Rodríguez-Félix<sup>1</sup>, C. L. Del Toro-Sánchez<sup>1</sup>, J.L. García-Hernández<sup>2</sup>,  
and E. O. Rueda-Puente<sup>3\*</sup>**

<sup>1</sup>DIPA-Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad de Sonora (UNISON), Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Col. Centro, C.P. 83000, Hermosillo, Sonora, México. Email: [anayzaeh@gmail.com](mailto:anayzaeh@gmail.com), [francisco.wong@unison.mx](mailto:francisco.wong@unison.mx), [jesus.borboa@unison.mx](mailto:jesus.borboa@unison.mx), [rodriguez\\_felix\\_fco@hotmail.com](mailto:rodriguez_felix_fco@hotmail.com), [carmen.deltoro@unison.mx](mailto:carmen.deltoro@unison.mx).

<sup>2</sup>Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez, Carretera Gómez Palacio - Tlahualilo Km. 32, Venecia, Gómez Palacio, Durango. México. Email: [luis\\_garher@ujed.mx](mailto:luis_garher@ujed.mx).

<sup>3</sup>DAG-UNISON-Departamento de Agricultura y Ganadería, Universidad de Sonora, Carretera Bahía Kino Km. 21, C.P. 305, Hermosillo, Sonora, México. \*Email: [erueda04@santana.uson.mx](mailto:erueda04@santana.uson.mx).

\*Corresponding author

### SUMMARY

**Background.** Chickpea (*Cicer arietinum* L.) is an important source of human and animal food, due to its high nutritional value and, therefore, it is considered the second legume in cultivated area worldwide. Currently, the population in the world is on the rise and with it the demand for food, which leads to increasing the exploitation of agricultural fields, with a respective increase in the use of fertilizers, mainly nitrogen fertilization (urea), which it is the one that largely guarantees the highest yields and quality of the grains. Nitrogen from urea is lost through volatilization and leaching processes by more than 50% before being assimilated by the plants and, on the other hand, the risks that occur due to the losses of pollutants that are released into the environment. **Objective.** The objective of this research was to carry out a systematic review of the general aspects of chickpea cultivation, with special emphasis on aspects of nitrogen fertilization, mainly in those studies carried out on the development of prolonged release systems (FLP) and / or controlled. of urea, which could be used in chickpea and other crops, as a fertilization alternative to avoid nitrogen losses and, consequently, contamination to the environment. **Methodology.** The study was carried out in accordance with the PRISMA statement (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses), a systematic literature study was carried out in the global databases Science Direct, JSTOR, Springer Link, Dialnet, Google Scholar, Google Scholar, using the Boolean operator as search terms: “systems, evaluation, methodologies, released fertilization, prolonged fertilization, agricultural sustainability”. Zotero ([www.zotero.org](http://www.zotero.org)), a free access manager for bibliographic references, was used. The University of Sonora database was reviewed. **Results.** Various databases with information related to chickpea cultivation, its importance, distribution and world production under arid environments and its interaction with symbiotic nitrogen fixation were detected; fertilization alternatives to avoid N losses in arid zones, specifically in those with prolonged release. **Implications.** FLP technology in agriculture includes the prolonged delivery of nutrients (fertilizers) to the plant, increasing its efficiency and reducing the negative effects associated with overdose. This technology has the function of releasing the nutrients to the plants at a speed close to the nutrient demand of the plants, for a prolonged period. **Conclusions.** The studies with FLP open a new way to reduce irrational applications of nitrogen chemical fertilizers, mainly in arid zones where there are the greatest problems due to leaching, due to the characteristics of the soils. Subject of great interest, in which it continues to be deepened, with the aim of obtaining a harmonized method to determine the

† Submitted September 16, 2020 – Accepted January 28, 2021. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.  
ISSN: 1870-0462.

translocation of nutrients from the FLP to the soil solution and, taking into account the influence of existing factors.

**Keywords:** chickpea; *Cicer arietinum* L.; nitrogen fertilization; prolonged release; wheat gluten.

## RESUMEN

**Antecedentes.** El garbanzo (*Cicer arietinum* L.) es una fuente importante de alimento humano y animal, debido al alto valor nutricional que posee y, por ende, es considerada la segunda leguminosa en superficie cultivada a nivel mundial. Actualmente, la población en el mundo va en ascenso y con ello la demanda de alimentos, lo que conlleva a elevar la explotación de los campos agrícolas, con un respectivo aumento en el uso de los fertilizantes, principalmente la fertilización nitrogenada (urea), que es la que garantiza en gran medida los mayores rendimientos y calidad de los granos. El nitrógeno proveniente de la urea se pierde mediante los procesos de volatilización y lixiviación en más del 50% antes de ser asimilado por las plantas y, por otro lado, los riesgos que se producen debido a las pérdidas de los contaminantes que se liberan al medio ambiente. **Objetivo.** El objetivo de esta investigación fue realizar una revisión sistemática de los aspectos generales sobre el cultivo de garbanzo, haciendo especial énfasis en aspectos de fertilización nitrogenada, principalmente en aquellos estudios realizados, sobre el desarrollo de sistemas de liberación prolongada (FLP) y/o controlada de urea, los cuales pudieran ser utilizados en el garbanzo y otros cultivos, como una alternativa de fertilización para evitar las pérdidas de nitrógeno y, por consiguiente, las contaminaciones hacia el medio ambiente. **Metodología.** El estudio se llevó a cabo en conformidad con la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses), se realizó un estudio sistemático de literatura en las bases de datos globales Science Direct, JSTOR, Springer Link, Dialnet, Google Scholar, Google Académico, utilizando como términos de búsqueda el operador Booleano: “garbanzo, metodologías de fertilización liberada, fertilización prolongada, sustentabilidad agrícola”. Se empleó Zotero ([www.zotero.org](http://www.zotero.org)), un gestor de acceso libre para las referencias bibliográficas. Se revisó la base de datos de la Universidad de Sonora. **Resultados.** Se detectaron diversas bases de datos con información relacionada con el cultivo de garbanzo, su importancia, distribución y producción mundial bajo ambientes áridos y su interacción con la fijación simbiótica del nitrógeno; las alternativas de fertilización para evitar pérdidas de N en zonas áridas, específicamente en aquellos de liberación prolongada. **Implicaciones.** La tecnología de los FLP en la agricultura incluye la entrega prolongada de los nutrientes (fertilizantes) a la planta, incrementando su eficiencia y disminuyendo los efectos negativos asociados con la sobredosis. Esta tecnología, tiene la función de liberar los nutrientes a las plantas a una velocidad cercana a la demanda de nutrientes de las plantas, durante un periodo prolongado. **Conclusiones.** Los estudios con FLP abren un nuevo camino para la reducción en las aplicaciones irrazonables de fertilizantes químicos nitrogenados, principalmente en las zonas áridas donde existen los mayores problemas por lixiviación, debido a la característica que presentan los suelos. Tema de gran interés, en el que se continúa profundizando, con el objetivo de obtener un método armonizado para determinar la translocación de los nutrientes desde el FLP hacia la solución del suelo y, que se tenga en cuenta la influencia de los factores existentes.

**Palabras claves:** garbanzo; *Cicer arietinum* L.; fertilización nitrogenada; liberación prolongada; gluten de trigo.

## INTRODUCCIÓN

El garbanzo (*Cicer arietinum* L.) se cultiva en muchas partes del mundo por ser una fuente importante de alimento humano y animal, debido a su alto valor nutricional, uso y preferencia (Acosta *et al.*, 2013). Es considerada la segunda leguminosa en superficie cultivada a nivel mundial, con 14,5 millones de ha en más de 50 países y rendimientos de 14 millones de toneladas (Azeem y Thanh, 2014; Ortiz *et al.*, 2017). En México el garbanzo ocupa el tercer lugar en la producción de leguminosas, después del frijol y la soya y se cultiva generalmente en la región Noroeste, que abarca los estados de Sinaloa, Sonora y Baja California Sur. Estos estados, son los principales productores de garbanzo de la

variedad tipo Kabuli, generando el 80% de este grano en el país (Apáez *et al.*, 2016; 2017).

El garbanzo es un mejorador de la estructura y fertilidad del suelo, debido a la fijación simbiótica con bacterias del género *Rhizobium* que pueden fijar el nitrógeno (N) atmosférico, superior a los 70 kg ha<sup>-1</sup>. Sin embargo, esta fijación de N en los nódulos de la raíz de las plantas, comienza aproximadamente un mes después de la siembra (Martínez, 2018), ya que en las reservas de la semilla el N es insuficiente y necesita obtenerlo del suelo (Apáez, 2016).

En suelos áridos y salinos como lo es el Noroeste de México, son pobres en materia orgánica y una microbiota en su mayoría libre de

microorganismos noduladores. Esta situación, repercute una nula capacidad de establecer simbiosis con *Rhizobium*, ya que en ocasiones no están presentes las bacterias o sus poblaciones son insuficientes para lograr una simbiosis efectiva (Apáez, 2016). En este sentido, para conseguir un buen desarrollo del cultivo en ambientes donde hay poca disponibilidad de materia orgánica, se requiere de aplicaciones de fertilizantes químicos como la urea ( $\text{CO}_2$  ( $\text{NH}_2$ ) fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) y potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) en su etapa inicial. La urea es esencial para todos los cultivos por el alto contenido de N (N: 46%) que posee, así mismo es de vital importancia en el crecimiento y desarrollo de las plantas, aumentando considerablemente los rendimientos (Fageria y Baligar, 2005). No obstante, el N se pierde mediante los procesos de lixiviación y volatilización antes que la planta lo llegue a asimilar, reduciendo el potencial de rendimiento de los cultivos y la calidad de sus granos (Havlin y Nelson, 2005; Apáez, 2016). Así mismo, el efecto contaminante de la atmósfera que se produce, por la emisión de gases de efecto invernadero con la liberación del dióxido de N, que es el principal contaminante antropogénico de la fertilización nitrogenada (Tasca y Rigamonti, 2017; Wu *et al.*, 2018).

En las últimas décadas, la agricultura sustentable en zonas áridas propone la implementación de alternativas, con el fin de evitar las pérdidas de nitrógeno y lograr estrategias para reducir los costos económicos y ambientales, (Mukerabigwi *et al.*, 2015). Recientemente, se han desarrollado sistemas de liberación prolongada y controlada de fertilizantes de urea, los cuales tienen la capacidad de proporcionar el nutriente adecuadamente de acuerdo con las necesidades de la planta, evitando la pérdida de este por escurrimiento y hacia el medio ambiente (Azeem y Thanh, 2014). Estos sistemas requieren la utilización de un material 100% natural, biodegradable, de bajo costo y altamente disponible; característica necesaria para evitar la contaminación del suelo y obtener un sistema de liberación a bajo costo, centrados en mejorar la eficiencia de N en diferentes cultivos (Blomfeldt y Hedenqvist, 2011). El gluten de trigo (WG), es un polímero natural que posee dichas características y está compuesto por proteínas de bajo y alto peso molecular: gliadinas (28,000 - 35,000 Da) y glutaminas (70,000 hasta > 10 millones de Da), respectivamente (Scherf y Wieser, 2016). Ambas proteínas han sido investigadas por su uso en la preparación de materiales a nanoescala y microescala, así como en sistemas de liberación controlada y

prolongada, con alto potencial de aplicación en campos agrícolas (Ghormade y Paknikar, 2011; Castro *et al.*, 2012; Barreras-Urbina *et al.*, 2016). Esta revisión se realizó con el objetivo de abordar aspectos generales sobre el cultivo de garbanzo, con énfasis en aspectos de la fertilización nitrogenada. Así como, el estudio sobre el desarrollo de sistemas de liberación prolongada y/o controlada de urea, los cuales pudieran ser utilizados en el garbanzo y otros cultivos, como una alternativa de fertilización para evitar las pérdidas de N y, por consiguiente, las contaminaciones hacia el medio ambiente.

## METODOLOGIA

La presente revisión de literatura incluyó una búsqueda de artículos concernientes a las palabras clave de garbanzo incluyendo su nombre científico (*Cicer arietinum* L.); fertilización nitrogenada y/o liberación prolongada. Las bases de datos analizadas fueron aquellas al interior de la Universidad de Sonora. Se analizaron 146 artículos publicados desde enero de 1992 hasta diciembre de 2020. Se puede apreciar en el presente documento, 24 artículos (16.44%) corresponden de 1990 a 2000; un total de 49 artículos corresponden a un 33.56% de 2000 a 2010; y de 2010 a 2020, un total de 57 trabajos que indican un 39% del total de la revisión auscultada. Asimismo, el estudio se llevó a cabo en conformidad con la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses); se realizó un estudio sistemático de literatura en las bases de datos globales Science Direct, JSTOR, Springer Link, Dialnet, Google Scholar, Google Académico, utilizando como términos de búsqueda el operador Booleano. Se puede identificar que del 100% de los artículos en la presente revisión, corresponde a un 21.23% (33 artículos) al cultivo de garbanzo; un 25.34% de documentos (37) al tema de fijación simbiótica del nitrógeno, mientras que un 26% (38) a fertilizantes de liberación prolongada (FLP). Por su parte del número total de artículos, 40 son relacionados con otros cultivos agrícolas de importancia económica.

Se empleó Zotero ([www.zotero.org](http://www.zotero.org)), un gestor de acceso libre para las referencias bibliográficas y fueron excluidos aquellos artículos que, aunque mostraran las palabras clave de búsqueda, pero no estuvieran relacionados con cultivos agrícolas por no adecuarse a los objetivos de la investigación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Características generales del garbanzo

El garbanzo, es una leguminosa de grano y cuya utilidad primaria reside en las semillas, formado parte de la dieta humana desde la antigüedad debido principalmente, a su alto contenido en proteínas y a la adecuada proporción de grasas y de hidratos de carbono que poseen. La semilla de garbanzo presenta un contenido medio de proteína (20.3 a 28.2%) algo más bajo que el de otras leguminosas de grano, sin embargo, su proteína es de las más digestibles, que unido a su aceptable contenido en hidratos de carbono (35 a 43%), un contenido en grasa más elevado que en otras leguminosas (3 a 6%), rica en ácidos grasos insaturados (ácido oleico y linoléico) (Gil *et al.*, 1996) y a la baja presencia de factores antinutritivos, la convierten en una semilla muy interesante desde el punto de vista del consumo humano y la alimentación animal. Las proteínas del garbanzo, como las del resto de leguminosas, se caracterizan por ser pobres en aminoácidos azufrados y ricas en lisina, por lo que son ideales para complementar las proteínas de los cereales, ricas en aminoácidos azufrados y pobres en lisina. Contribuye significativamente a la nutrición diaria en países como la India o Pakistán y en la región Mediterránea. Es destacable la versatilidad de su utilización, siendo un ingrediente importante en muchos platos (Wang *et al.*, 2010). Puede consumirse de diferentes formas como las semillas verdes y los tallitos jóvenes, en forma de harina en la elaboración de sopas o cremas, o como grano seco entero tostado o hervido, que es como se come en la cuenca Mediterránea (Gil *et al.*, 1996).

### Origen y evolución del cultivo de garbanzo

El garbanzo, tuvo su origen en el Próximo Oriente hace unos 10000 años (Lev-Yadun y Abbo, 2000). Es uno de los cultivos con los que se inició la agricultura junto con el trigo, la cebada, el lino y otras leguminosas (Ladizinsky y Adler, 1976). De Miguel Gordillo (1991), situó el origen del garbanzo en el área del sur del Caúcaso y al norte de Persia donde se han hallado los restos más antiguos (datados en 5450 A.C.) y donde se han descubierto dos especies silvestres estrechamente relacionadas con el garbanzo cultivado, *Cicer echinosperma* P.H. Davis y *Cicer reticulatum* Ladiz. Más tarde, Vavilov (1926), identificó dos centros de diversidad primaria al sur-oeste de Asia y el Mediterráneo y un centro de diversidad secundario en Etiopía. Probablemente mutaciones,

como vaina indehisciente, hábito más erecto y semillas sin dormancia hayan jugado un papel importante en el proceso de su domesticación. Se dispersó desde su centro de origen hacia el Este hasta la India, hacia el Sur llegó a Etiopía a través del valle del Nilo y hacia el Oeste por la cuenca Mediterránea (Van der Maesen, 1987). En su camino evolutivo el garbanzo ha ido acumulando numerosas mutaciones, como la flor blanca, insensibilidad al fotoperiodo, tegumento o cubierta de la semilla más delgada, porte erecto, entre otras, generando una alta diversidad fenotípica para diferentes caracteres morfológicos y agronómicos (Upadhyaya y Singh, 2002). Sin embargo, se ha descrito que tiene una base genética muy estrecha desde el punto de vista molecular, hecho que unido a la zona limitada donde se distribuye su ancestro silvestre sugieren un origen monofilético de esta especie cultivada (Espeche y Ploper, 2015). Así pues, el paso de silvestre ha cultivado, ha supuesto una ganancia de caracteres deseables agronómicamente y pérdida de los indeseables. Se han encontrado grandes diferencias entre la especie silvestre y la cultivada, especialmente en el área foliar, hábito de crecimiento, altura de la planta, dehiscencia de vainas y peso de 100 semillas, lo que sugiere que son estos los caracteres que han sufrido mayores cambios durante su domesticación (Moreno y Cubero, 1978).

Durante el proceso de dispersión y selección, el germoplasma de *C. arietinum* parece haberse diferenciado en dos acervos genéticos diferentes que según Wood y Choct (2011), tras analizar tanto caracteres cuantitativos como cualitativos, propusieron como razas microsperma y macrosperma. En este sentido, los mejoradores, dentro de la especie cultivada, distinguen dos tipos morfológicamente diferentes: “Desi y Kabuli”. Las flores color rosas, semillas pequeñas, angulares y con una cubierta gruesa y algo rugosa suelen ser características de los tipos Desi (similar a microsperma) cultivados principalmente en India, Pakistán, Este de África y más recientemente en Australia. El tipo Kabuli (similar a macrosperma) poseen flores blancas y semillas grandes y redondeadas de color claro, la cubierta es fina y lisa, se encuentran fundamentalmente en la cuenca Mediterránea, el Cercano Oriente, México y más recientemente en Estados Unidos y Canadá. Estos tipos también difieren en una serie de características agronómicas como la tolerancia al frío, resistencia a la rabia (enfermedad de gran importancia en el cultivo) y hábito de crecimiento erecto son más frecuentes en los garbanzos tipo Kabuli. Los tipos Desi suelen presentar tolerancia a

altas temperaturas, sequía, resistencia a *fusarium* (otra de las enfermedades de gran relevancia en el garbanzo) y precocidad (Singh y Jambunathan, 1981). Parece ser que los tipos Kabuli, con menor variabilidad, evolucionaron a partir de los Desi y caracteres oligogénicos como color de flor, grosor de la cutícula y tamaño de la semilla han jugado un papel importante en su evolución (Moreno, 1978; Gil *et al.*, 1996).

### **Taxonomía y descripción morfológica del garbanzo**

El garbanzo es una planta anual, autógama y diploide ( $2n=2x=16$ ) y con un contenido de ADN de 738 Mb y unos 28.269 genes (Varshney *et al.*, 2013). Pertenece a la familia de las leguminosas (*Fabaceae*), subfamilia *Papilionáceas*, tribu *Ciceræ* y género *Cicer*, que consta de nueve especies anuales y 35 perennes (Van der Maesen, 1987) de las que *C. arietinum* es la única especie cultivada. Este género ha sido tradicionalmente clasificado en cuatro secciones basándose en características morfológicas, ciclo de vida y en su distribución geográfica (*Monocicer*, *Chamaecicer*, *Polycicer* y *Acanthocicer*) (Van der Maesen, 1987). Las especies anuales, incluyendo el garbanzo cultivado pertenecen a la sección *Monocicer*. Es una especie dicotiledónea, herbácea que alcanza aproximadamente una altura de 40-60cm. Con tallos ramificados y pelosos y un sistema radicular profundo que se compone de una raíz principal pivotante (0,50 - 1m de profundidad aproximadamente) y raíces laterales. El tallo puede ser erecto, semierecto (frecuente en las variedades cultivadas) o rastroso (silvestres). Éste tiene tres ramificaciones principales y en términos de producción la segunda es la más importante (Cubero, 1987). Las hojas se disponen alternas a lo largo del tallo, son pseudoimparipinnadas con número variable de foliolos por hoja (6-7 a 16-18) que son subelípticos y dentados. Las flores son axilares solitarias y una por nudo, aunque en ocasiones pueden aparecer dos flores por nudo. Son de color blanco o púrpura y presentan las características típicas de una flor papilionácea. Son flores hermafroditas y autógamas. El fruto es una vaina bivalva con una o dos semillas en su interior, aunque existen genotipos que pueden presentar tres semillas por vaina. Son globosas, vellosas y de pequeño tamaño (2,5-3cm.), confiriéndole un aspecto característico. Las semillas, de forma globosa o bilobular, son en general puntiagudas y muestran un pico característico (recto o curvado) en la zona donde aparecerá la radícula. La superficie de la semilla puede ser lisa o rugosa y presenta una amplia

gama de colores entre el blanco, crema, amarillento, anaranjado, marrón, rojizo o negro (Wood *et al.*, 2011).

### **Importancia, distribución y producción de garbanzo a nivel mundial**

El garbanzo se cultiva en muchas partes del mundo por ser una fuente importante de alimento humano y animal, fue difundido primeramente por los españoles y portugueses (Van der Maesen, 1987) y hoy en día está ampliamente distribuido en los climas áridos y semiáridos de más de 50 países en el mundo, incluyendo el Oeste y Sur de Asia, Norte y Este de África, Sur de Europa, Norte y Sur de América y Australia y en regiones templadas, subtropicales y tropicales como cultivo de invierno (Apáez, 2016). Se considera un cultivo rústico ya que muestra gran resistencia al calor y a la sequía y es capaz de producir en suelos con baja fertilidad. Aunque es sensible al frío, algunos cultivares pueden tolerar temperaturas bajas (Ravi y Harte, 2009), por lo que encontró una excelente adaptación en el Noroeste de México a principios del siglo XX que se introdujo (Morales, 2004).

El garbanzo es considerado la segunda leguminosa en superficie cultivada a nivel mundial, después del frijol, alcanzando en el año 2017 una producción mundial de 14 millones de toneladas (Ortiz, 2017). De ellos, el 89.2% se cultiva en Asia y representa el 84.5% de la producción mundial, la India es el principal país productor de garbanzo con el 73.3% de la superficie mundial y el 67,4% de la producción. Pakistán ocupa el segundo lugar con el 7.3% de la superficie mundial y el 5.7% de la producción, seguido por Australia (6.2% de la superficie cultivada, 4.2% de la producción), Irán (4.1% de la superficie cultivada, 2.3% de la producción) y Turquía (0.3% de la superficie cultivada, 0.37% de la producción) (Medina *et al.*, 2014).

En México, el garbanzo ocupa el tercer lugar en la producción de leguminosas, después del frijol y la soya. Durante el ciclo agrícola 2013/2015, la superficie cosechada fue de aproximadamente 94 mil hectáreas, obteniéndose una producción aproximada de 181 mil toneladas. Durante el año 2015 el 82.3% de la superficie sembrada, se destinó a la variedad Kabuli generando el 73.6% de la producción total de garbanzo; mientras que el 16.2% de la superficie se destinó a la variedad Desi, que generó el 26.3% de la producción nacional. Como el garbanzo es un cultivo que tiene la ventaja de resistir a la sequía, se cultiva

generalmente en la región Noroeste, que abarca los estados de Sinaloa, Sonora y Baja California Sur, los cuales son los principales productores de la variedad Kabuli de garbanzo generando el 80% de este grano en el país (Ortega *et al.*, 2013; 2016).

La producción de garbanzo en México se destina al consumo humano y como grano de exportación, en menor cantidad su consumo es en fresco, también se produce para la formulación de alimentos balanceados en la industria porcícola en Guanajuato, Michoacán y Jalisco (Acosta *et al.*, 2013). El garbanzo que se cultivado se caracteriza por la forma, color y tamaño del grano, que es grande y producido por variedades desarrolladas en México. Este cultivo, se siembra en el ciclo agrícola otoño-invierno, por sus bajos requerimientos de agua para su desarrollo y por su importancia económica, que es un generador de divisas, ya que se reporta que en un periodo de cinco años se logró obtener más de 100 millones de dólares en la venta de la producción en el mercado internacional (Manjarrez *et al.*, 2004). En climas áridos - desérticos, el garbanzo puede desarrollar su máximo potencial genético y con un costo agronómico relativamente accesible; es una especie muy adaptada a las zonas desérticas, resistente a altas temperaturas, de bajo consumo de agua y por la radiación y minerales de los suelos, el grano es de alta calidad nutricional, por lo que se encuentra entre los principales cultivos con interés comercial de exportación (Soren *et al.*, 2016). En este sentido, Sonora es uno de los principales estados productores de garbanzo de la variedad Kabuli, ocupando el segundo lugar después de Sinaloa, con una aportación en producción durante el año 2016 de 35,824 toneladas, lo que representa un 29.4% de la producción nacional. Los principales municipios productores de garbanzo en el estado de Sonora son: Hermosillo (27,632 toneladas), Cajeme (7,064 toneladas), Navojoa (1,019 toneladas) y Guaymas (108 toneladas) (SIAP, 2015; 2017).

### **Principales características agroecológicas de los ecosistemas de zonas áridas – desérticas**

Las zonas áridas son aquellas donde la evaporación potencial es mucho mayor que la lluvia anual (Thornthwaite, 1948; Meigs, 1953; Trewartha, 1954) y en las cuales los niveles de disposición de agua, precipitación y humedad se encuentran por debajo del promedio mundial anual (Rzedowski, 1968). Las zonas áridas se caracterizan por ser ambientes en donde la pérdida de agua por evaporación es mucho mayor que la

entrada por la precipitación, las temperaturas son extremas y, en general, la disponibilidad de nutrientes en el suelo es baja (Montaño *et al.*, 2016; Whitford, 2019). A pesar de su apariencia desolada e improductiva, los ecosistemas áridos muestran una alta diversidad biológica y contienen una red importante de interacciones biológicas y de movimiento de materia y energía entre las especies y el medio abiótico (White y Nackoney, 2003).

Las zonas áridas son de las áreas más importantes de producción agrícola a nivel mundial, en ellas se producen el 60% de los alimentos (Vázquez *et al.*, 2005). En la República Mexicana, una de las zonas de mayor relevancia en la producción de alimentos, es el noroeste de México, el cual está conformado por los estados de Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Sinaloa y Sonora (López *et al.*, 2001; Martínez *et al.*, 2012). Las condiciones que prevalecen en esta región van desde los 50 a 230 mm de precipitación anual, con temperaturas que oscilan en los meses de verano entre los 38 y los 52° C; una marcada fluctuación de temperaturas diurna / nocturna y de la velocidad del viento; baja disponibilidad de agua, debido a la alta evaporación; una radiación solar incidente; los suelos de estas zonas son variables en profundidad, textura, pH alcalinos, conductividad eléctrica altas y baja fertilidad; en ellos se acumulan carbonato y la tasa de infiltración del horizonte cálcico depende del contenido de carbonato (Mazuela, 2013); la intrusión salina se enfatiza provocando que las conductividades eléctricas varíen entre los 2 a los 8 decisiemens, ensalitrando los pozos de agua utilizados para la agricultura y lleguen a contener hasta  $8 \pm 4$  gr/L de agua de sólidos disueltos (López, 2001; Mazuela, 2013).

El N es, después del agua, el nutriente más limitante para la productividad de las plantas de zonas áridas y semiáridas (Vitousek *et al.*, 1997). En forma natural, el N se encuentra en la atmósfera como gas, en un reservorio no disponible para las plantas, por lo que, para poder utilizarlo, las plantas requieren establecer simbiosis con algunas especies de bacterias, lo que sucede por ejemplo en diversas especies de la familia de las leguminosas entre otras, lo que les permite aportar materia orgánica rica en N al suelo de zonas áridas (Schlesinger *et al.*, 1996; Chapin *et al.*, 2002; Whitford, 2019). La poca materia orgánica del suelo no puede ser utilizada por las plantas directamente, y para ello debe

descomponerse y mineralizarse, procesos que son llevados a cabo principalmente por microorganismos del suelo, los cuales, a su vez en ambientes áridos, no tienen siempre condiciones ideales para su actividad en cuanto a temperatura y humedad, por lo que los procesos de mineralización de N en zonas áridas se dan por periodos breves de tiempo generalmente posteriores a pulsos de precipitación (Celaya *et al.*, 2010). En la mineralización de N en zonas áridas son de gran importancia las altas temperatura, la humedad variable e impredecible y las especies de plantas presentes, como determinantes de su gran heterogeneidad temporal y espacial (Binkley y Vitousek, 1989). La utilización de los ecosistemas áridos por el hombre puede ocasionar perturbaciones que rompen el equilibrio en los procesos del suelo, su capacidad auto reguladora y el reciclaje de materia orgánica y nutrientes, pudiendo favorecer pérdidas de N del sistema y de fertilidad del suelo (Whitford, 2019).

#### **Ciclo del nitrógeno y su fijación biológica o simbiótica en ecosistemas áridos – desérticos**

El N es el elemento más limitante en los ecosistemas terrestres, de todos los nutrientes del suelo necesarios para el crecimiento de las plantas (Vitousek *et al.*, 1997), en especial en ecosistemas áridos y semiáridos (Schlesinger *et al.*, 1996; Chapin *et al.*, 2002; Whitford, 2019). El N inorgánico está constituido por las formas solubles como nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y nitrato ( $\text{NO}_2^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) intercambiable y no intercambiable fijado en las arcillas (Van Eerd *et al.* 2014). El contenido de N orgánico en el suelo incluye una gran variedad de formas (Binkley y Vitousek, 1989), puede no estar disponible para las plantas en moléculas complejas o perderse por desnitrificación, erosión del suelo, lixiviado, volatilización (Philippot y Germon, 2005), y desempeña un papel importante en la composición y diversidad de las especies, y en la dinámica y funcionamiento de la mayoría de los ecosistemas. La mayoría de las plantas nativas de cada región están adaptadas y su funcionamiento óptimo va de acuerdo a las concentraciones más bajas de N disponible en sus suelos (Vitousek *et al.*, 1997). La atmósfera es el reservorio más grande de N con un 79% en su forma elemental ( $\text{N}_2$ ), sin embargo, metabólicamente no está disponible para su asimilación por las plantas superiores que no poseen mecanismos para romper el triple enlace covalente (Philippot y Germon, 2005).

El N en forma gaseosa es la principal fuente primaria de entrada para los ecosistemas, existen organismos simbiotes y de vida libre con la capacidad de fijarlo de la atmósfera (Vitousek y Howarth, 1991). El proceso de fijación de N es complejo y envuelve a una variedad de microorganismos, microfauna del suelo, plantas y animales, representa una entrada al ciclo terrestre del N de gran importancia para ecosistemas áridos. Muchas leguminosas son componentes importantes de los ecosistemas áridos y semiáridos. La mayoría de estas especies presentan adaptaciones morfofisiológicas frente al estrés hídrico y salino. En suelos pobres de N sus raíces se asocian con los rizobios del suelo, dando origen a estructuras especializadas denominadas nódulos, donde se produce la fijación biológica (FBN) o simbiótica (FSN) de nitrógeno atmosférico. Estas características favorecen la supervivencia y productividad de las leguminosas en zonas donde otras plantas no pueden crecer ni establecerse, por lo que se constituyen en especies promisorias de ecosistemas desérticos (Sprent y Parsons, 2000). En estos últimos años, ante la necesidad de responder a las amenazas de un cambio climático y un aumento de la desertificación, se despertó un mayor interés, por parte de los investigadores, en comprender cómo ciertas leguminosas y los simbiotes asociados son capaces de sobrevivir y fijar N atmosférico en un ambiente de condiciones adversas (Graham y Vance, 2000).

Las leguminosas son las plantas más reconocidas como fijadoras de N, presentando una simbiosis con bacterias del género *Rhizobium* o *Bradyrhizobium*, formando nódulos donde la bacteria fija N (Whitford, 2019). Varios tipos de bacterias y algas azul-verde poseen la enzima nitrogenasa, que convierte el  $\text{N}_2$  atmosférico a amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). Algunas de ellas como *Rhizobium* y actinomicetos del género *Frankia* existen en asociaciones simbióticas con plantas, pero otras como *Azobacter* ocurren en forma de vida libre en los suelos. En los ecosistemas desérticos son de gran importancia ambos procesos de fijación (Whitford, 2019), por simbiosis se beneficia la planta hospedera (Veluci *et al.*, 2006; Schlesinger, 1997). La fijación biológica (FBN) o simbiótica de N (FSN) con microorganismos de vida libre y simbiótica con algunas plantas, representa una importante entrada de N al suelo, lo cual cobra especial importancia en ecosistemas limitados por N, como son las zonas áridas y semiáridas. La planta se beneficia con la asociación simbiótica y al morir, sus hojas o raíces aportan N disponible

tanto a microorganismos como a otras plantas (Vitousek *et al.*, 1997).

### **Fijación simbiótica de nitrógeno en el cultivo de garbanzo**

El potencial para fijar N en garbanzo como en otras leguminosas en simbiosis con bacterias del género de *Rhizobium* es del 60 al 70 % (Rupela, 1987), característica que le permite mantener adecuados niveles de producción sin depender de grandes suministros de fertilizantes nitrogenados (Urquiza *et al.*, 2011). En este sentido, el principal beneficio que recibe el suelo proviene de la FSN, que puede ascender a 140-176 kg de N/ha anualmente (Saraf *et al.*, 1998). La FSN, es el proceso que realizan diferentes tipos de microorganismos (bacterias) para transformar el N atmosférico en amoníaco, catalizando el complejo enzimático nitrogenasa (Moreno *et al.*, 1983), que permite su desarrollo en condiciones de presión y temperaturas ambientales (Baca *et al.*, 2000). Entre los microorganismos de FSN se encuentran: (organismos diazotrofos) en vida libre (*Clostridium*, *Klebsiela*, *Azotobacter*, *Beijerinckia*) o en asociaciones con plantas (*SinoRhizobium*, *AlloRhizobium*, *AzoRhizobium*, *BradyRhizobium*, *MesoRhizobium*, *Rhizobium*, *Frankia* y *Nostoc*). La más importante desde el punto de vista agronómico y económico es la que realizan los rizobios, un grupo de bacterias pertenecientes al género *Rhizobium* (Bernabeu *et al.*, 2015), con plantas leguminosas (Baca *et al.*, 2000; Moreno *et al.*, 1983; Lampkin, 2001; Van Cauwenbergh *et al.*, 2015), ya que son conocidos por su gran capacidad fijadora de N (Abd-Alla *et al.*, 2014). Sin embargo, se ha estudiado que la FSN en ambientes áridos como lo es el Noroeste de México, puede ser ineficiente, ya que los rizobios nativos no tienen la capacidad suficiente para formar una simbiosis eficaz o eficiente con el cultivo, disminuyendo el desarrollo y el rendimiento del grano atribuyéndose este efecto y principalmente si se siembra leguminosa por primera vez en esa área y a la acción negativa de factores bióticos y abióticos existentes en el suelo (Abd-Alla *et al.*, 2014).

Estudios realizados, mostraron que se puede lograr simbiosis y un aumento en el rendimiento de grano a través de la inoculación de garbanzos con rizobio (70-72%) (El Hadi y Elsheikh, 1999). No obstante, el establecimiento de una simbiosis efectiva entre garbanzo y *Rhizobium*, es un proceso complejo, ya que se requiere de mecanismos de señalización y

recepción específicos de ambas partes (Baca *et al.*, 2000). Según Gresshoff *et al.* (2015), afirman que la FSN no es un proceso fácil, debido a la relación específica entre la leguminosa y rizobio, ya que existe especificidad entre el tipo de metabolito (flavonoide) liberado por cada especie de leguminosa y los genes de nodulación de cada rizobio, de tal forma que cada especie de rizobio establece simbiosis con un rango muy limitado de especies de leguminosas y en ocasiones con una en exclusiva. Así mismo, la capacidad de fijar N varía considerablemente con la especie de leguminosa, en este caso, de la biología del cultivo de garbanzo y de las condiciones edafoclimáticas, característica por la cual que depende la interacción entre ambos simbioses (Moreno, 1983).

### **Biología y parámetros de la nodulación rizobial para la FSN en garbanzo**

El garbanzo se cultiva principalmente en regiones áridas y semiáridas de todo el mundo, con temperaturas entre 5 y 25 °C y precipitaciones anuales de 200-600 mm, en suelos de secano (franco arenoso a limoso) con humedad residual (Rupela, 1990; Millan *et al.*, 2006; Chibarabada *et al.*, 2017). En los trópicos, se cultiva en invierno (Gaur *et al.*, 2010) y generalmente se considera una planta de día largo (más de 12 h) (Chibarabada *et al.*, 2017). Debe tenerse en cuenta que un fotoperíodo de 20 h inhibe la nodulación en este cultivo (Dart *et al.*, 1975). Se reconocen dos grandes grupos comerciales de garbanzos: tipo kabuli y Desi, siendo esta última la más utilizada para el consumo y comercialización a nivel mundial (Gaur *et al.*, 2010). El garbanzo puede obtener hasta el 80% de N para su crecimiento del aire a través de la simbiosis con rizobio, bacteria del suelo que desencadena la formación de órganos especializados llamados nódulos de raíz. En condiciones de campo, aparecen nódulos sobre un mes después de la emergencia de la planta. Su distribución se limita generalmente a los 15 cm superiores del suelo (Rupela y Dart, 1997). A diferencia de otras legumbres, los nódulos de garbanzo están fuertemente unidos a las raíces (Rupela, 1990). La morfología del nódulo de garbanzo es del tipo indeterminado, con zonas de desarrollo claras, similares a los nódulos de otras leguminosas como *M. truncatula* (Kantar *et al.*, 2007; Varshney *et al.*, 2009). Sin embargo, a diferencia de *M. truncatula*, el metabolismo del N en el garbanzo implica la exportación de amidas y ureidas de los nódulos (Thavarajah *et al.*, 2005). Se cree que la infección

por rizobios en el garbanzo comienza con la entrada de la raíz y continúa con hilos de infección intercelular, desde los cuales los rizobios encerrados en una membrana derivada de plantas (simbiosomas) se liberan en el citoplasma por un mecanismo similar a la endocitosis (Dart, 1975). Las células infectadas de la zona de fijación de N se llenan densamente de simbiosomas, con una sola célula rizobial diferenciada (bacteroid). Las células no infectadas en el área central de los nódulos son de menor tamaño y altamente vacuoladas (Rupela y Dart, 1997).

Un rasgo característico de la ultraestructura del nódulo de garbanzo es la presencia de inclusiones densas en electrones en los espacios intercelulares de la zona de fijación de N y también en plasmodesmos que conectan células infectadas y no infectadas (Kantar *et al.*, 2007). La forma de los nódulos es inicialmente alargada y se ramifica un meristemo de nódulo apical permanentemente activo, formando una estructura similar a un coral que puede ser 3 cm de ancho (Dart *et al.*, 1975). Los nódulos individuales pueden alcanzar una longitud de 3-4 mm (Aouani *et al.*, 2001). El número de nódulos por planta puede variar, según el genotipo del garbanzo, la cepa rizobial y las condiciones de crecimiento de 2-14 (Gul *et al.*, 2014), 8-38 (Khurana y Dudeja, 1996), 13-30 (Ben Romdhane *et al.*, 2007), 20-36 (Aouani *et al.*, 2001), o 21-101 (Biabani *et al.*, 2011). El peso seco del nódulo por planta varía entre 60 y 500 mg (Aouani *et al.*, 2001).

#### **Estado taxonómico de los rizobios nodulantes de garbanzos**

El garbanzo se consideraba tradicionalmente un huésped muy selectivo para la nodulación, principalmente porque no puede interactuar con rizobios altamente promiscuos, como *Rhizobium* sp. NGR 234 (Broughton, 1999; Perret *et al.*, 2000). *Mesorhizobium ciceri*, *M. mediterraneum* (Nour *et al.*, 1995) y *M. mule* (Zang *et al.*, 2014) se describieron como microsimbiontes específicos de garbanzos. Más tarde se descubrió que el rango y la diversidad genética de las especies de rizobios capaces de formar simbiosis con garbanzos son menos limitadas. Las cepas de rizobios aisladas de nódulos de garbanzos son: *M. loti* (Laranjo *et al.*, 2004), *M. amorphae* (Alexandre *et al.*, 2009), *M. tianshanense* (Rivas *et al.*, 2006), *M. temperata* (Dudeja, 2008), *M. huakuii* (Alexandre *et al.*, 2009). El garbanzo también puede ser efectivamente nodulado por inoculación de cepas de *Rhizobium leguminosarum* (Kantar *et al.*, 2003;

Gul *et al.*, 2014). La capacidad de interactuar con estos rizobios se debe a la alta similitud de los genes simbióticos nodC y nifH, que son compartidos por el rizobio mediante transferencia lateral de genes (Laranjo *et al.*, 2008).

#### **Factores que influyen en la nodulación en el garbanzo**

La baja disponibilidad de agua, las temperaturas subóptimas, los días largos, la salinidad excesiva y las altas cantidades de N en el suelo son factores que afectan en gran medida la nodulación en el garbanzo (Dart *et al.*, 1975; Rupela y Saxena, 1987; Elsheikh y Wood, 1990; Romdhane *et al.*, 2009). Por otro lado, el FSN en el garbanzo está influenciado negativamente por la deficiencia de nutrientes como P, Fe, Mo, Co, B y Zn (Yadav y Shukla, 1983; Yanni, 1992; Khan *et al.*, 2014; Esfahani *et al.*, 2016). Así ocurrió en la diversidad de rizobios nodulantes de garbanzos afectados por sequía (Romdhane *et al.*, 2009). Se cree que las temperaturas del suelo inferiores a 15 °C y superiores a 25 °C son perjudiciales para el FSN en el garbanzo (Rupela, 1990). Dart *et al.* (1975), informaron que las temperaturas cercanas a los 23 °C son óptimas para el desarrollo de nódulos y la FSN en garbanzos. Así mismo, examinaron el efecto del fotoperíodo sobre nodulación en garbanzos e informaron una influencia adversa de un régimen de luz de 20 h en la nodulación en comparación con la duración del día de 11 h. Esto se atribuyó al vigor general de la planta y a la senescencia acelerada de la base del nódulo en lugar de a la disminución de la actividad de la nitrógenasa. La salinidad en niveles bajos de sal reduce el número y peso de los nódulos en garbanzos, mientras que, a niveles superiores, inhibe por completo formación de nódulos (Elsheikh y Wood, 1990). Estudios realizados en campo se observó el efecto negativo del exceso de N sobre la nodulación en el garbanzo. Sheoran *et al.* (1997) informaron que la aplicación de 100 kg de N ha<sup>-1</sup> redujo la biomasa de los nódulos en comparación con la ausencia de N adicional agregado. Al mismo tiempo, el nivel elevado de N mejoró significativamente el rendimiento total de N y de granos en la planta (8,6-28,4%). De ahí que, se requiere de aplicaciones de fertilizantes nitrogenados (urea), generalmente sintéticos y además de las reservas de N inorgánico del suelo, para lograr una nutrición efectiva en el cultivo (Erman *et al.*, 2011).

## Fertilización a base de nitrógeno en el suelo

Aunque en las últimas décadas la aplicación de fertilizantes ha sido instrumental para el aumento de la productividad agrícola, estudios recientes sobre los efectos a largo plazo de tales agroquímicos confirman una disminución en la salud del suelo (El-Ghamry, 2018). En este sentido, todos los fertilizantes, en particular los fertilizantes nitrogenados están en el centro de una controversia. Los defensores de los fertilizantes utilizan argumentos basados en que los fertilizantes son indispensables para la producción de alimentos, principalmente en los países desarrollados, mientras que sus opositores argumentan que los fertilizantes contaminan el ambiente. A nivel mundial se vienen adoptando medidas preventivas que regulan el uso de fertilizantes con el objetivo de minimizar su impacto ambiental (Ahmed y Center, 1994; Peña-Haro, 2010). Sin embargo, el sentimiento generalizado hoy en día, es que los esfuerzos hechos no han sido suficientemente efectivos en la reducción de los problemas ambientales y de salud asociados con el uso de fertilizantes (Immanuel y Bianco, 2008).

Una de las desventajas de la fertilización con fuentes nitrogenadas sintéticas, es que cuando el suministro de N supera la absorción por las plantas y hay suficiente lluvia o irrigación disponible para saturar el suelo, una parte considerable del N aplicado se pierde, yendo a parar a fuentes acuáticas y/o a la atmósfera (Murua *et al.*, 2012). Del N aplicado a los cultivos, solamente un 10 - 50% suele ser absorbido por las plantas, mientras que el 50- 90% restante es susceptible de lixiviarse hacia aguas subterráneas y superficiales, generando contaminación por nitrato en las fuentes de agua cercanas a los cultivos (Almasri, 2007; Zhao *et al.*, 2011). Además, la volatilización de las fuentes fertilizantes de N también genera importantes problemas medioambientales. Se estima que la agricultura es la responsable de aproximadamente dos tercios de la emisión total de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) a la atmósfera, de más de un tercio de las emisiones de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y de alrededor de un cuarto de las emisiones de óxido nítrico (NO). Estos son gases de efecto invernadero que tienen numerosos efectos negativos sobre el medio ambiente como la eutrofización de ecosistemas una vez depositados en forma seca o húmeda, la producción de ozono troposférico, la disminución del ozono estratosférico, la acidificación de las precipitaciones y el calentamiento global. En concreto, se estima que

la agricultura contribuye en cerca de un 80% a las emisiones antropogénicas de  $\text{N}_2\text{O}$  y en casi un 40% a sus emisiones globales (Anderson, 2003; Zhang *et al.*, 2011).

Sin embargo, el uso de los fertilizantes nitrogenados todavía es muy común en los campos agrícolas, por lo que se estima que el uso de urea equivale al 78% del total de fertilizantes nitrogenados (Mukerabigwi *et al.*, 2015). En este contexto, se espera que la población mundial sea de 9.600 millones para 2050 y se ha pronosticado que la producción mundial de granos debe aumentarse en un 70% para satisfacer las demandas de alimentos para la población mundial en rápido crecimiento (DeSa, 2013; Guha y Mukherjee, 2020). Por otro lado, es probable que el suministro de alimentos se enfrente a una disminución debido a una reducción en los rendimientos agrícolas, por erosión de los suelos y otros factores ambientales. Estas condiciones conducen al aumento del uso de fertilizantes, principalmente en zonas áridas y semiáridas, con el aumento de la población y la demanda de alimentos, sin obviar que, estas prácticas aumentan los riesgos ambientales debido a los contaminantes que se liberan al medio ambiente y de los suelos (Wu *et al.*, 2018).

## La fertilización química convencional de zonas áridas: una tecnología obsoleta que debe reivindicarse

En suelos de zonas áridas, las pérdidas de N hacia la atmósfera por erosión, volatilización, nitrificación y desnitrificación son altas (Peterjohn y Schlesinger, 1990). La volatilización de amonio ocurre en suelos con pH de 7 o mayores, y como la mayoría de los suelos de los desiertos son básicos, existe un gran potencial de volatilización de amonio en sus suelos (Whitford, 2019), aunque es controlada por la tasa de amonificación (Peterjohn y Schlesinger, 1991). La desnitrificación es un proceso anaeróbico que lo llevan a cabo bacterias principalmente, algunos hongos y levaduras (Van Spanning *et al.*, 2005), consiste en la reducción microbiana de nitrato o nitrito a óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) o N elemental. Este proceso es afectado por la inmovilización microbiana. Al humedecerse el suelo y en presencia de carbono los microorganismos incorporan N a su biomasa, sin embargo, en suelos bajos en nutrientes se presentan altas tasas de desnitrificación similares a las de suelos de regiones templadas y tropicales (Peterjohn y Schlesinger, 1991).

Los impactos en el medio ambiente y en los costos de los cultivos por el creciente uso de fertilizantes químicos no han pasado desapercibidos por las ciencias relacionadas con la agricultura, desde las cuales se han desarrollado propuestas que van desde metodologías para hacer un uso óptimo de los mismos (Mukerabigwi *et al.*, 2015). Recientemente, se han venido estudiando nuevas alternativas tecnológicas aplicables para la urea, con el fin de evitar o disminuir las pérdidas del N proveniente de la urea en el suelo, que garanticen mayores rendimientos y calidad en productos agrícolas (Singh y Gupta, 2009; Sarigül y Inam, 2009). Así como, lograr estrategias para reducir los costos económicos y ambientales (Mukerabigwi *et al.*, 2015).

#### **Alternativa de fertilización para evitar las pérdidas de nitrógeno en zonas áridas**

En los últimos años, los investigadores se han centrado en mejorar la eficiencia del N en los campos agrícolas. El uso de fertilizantes de liberación prolongada (FLP) y controlada (FLC), se vienen desarrollando como una alternativa para evitar las pérdidas de N en el suelo. Los FLC y FLP son formulaciones que contienen un nutriente vegetal en una forma tal que retrasa su disponibilidad para la planta después de la aplicación, o permite su disponibilidad por un periodo de tiempo más largo que un fertilizante de rápida disposición como nitrato de amonio, urea, fosfato de amonio, entre otros (Trenkel, 1997). Este tipo de sistemas tiene la capacidad de proporcionar el nutriente lento y adecuadamente de acuerdo con las necesidades de la planta, evitando la pérdida de N hacia el medio ambiente (Azeem *et al.*, 2014). En las últimas décadas, se ha utilizado la urea formaldehído (UF), como sistemas de liberación lenta o prolongada. También, se ha desarrollado un sistema con urea recubierta con azufre y urea recubierta de polímero, considerándolos estos sistemas como FLC (Morgan, 2009; Yamamoto *et al.*, 2016). Zeng *et al.* 2016, estudiaron combinaciones de sistemas FLC de urea y urea convencional para mejorar la eficiencia del N en cultivos como el maíz. En sus estudios, se encontró que la combinación de ambas prácticas aumentó la eficiencia de este sistema. Además, disminuyó los costos de fertilizantes y manejo para su aplicación (Yang *et al.*, 2011).

#### **Fertilizantes de liberación prolongada: ventajas y criterios**

La tecnología de los FLP en la agricultura incluye la entrega prolongada de los nutrientes (fertilizantes) a la planta, incrementando su eficiencia y disminuyendo los efectos negativos asociados con la sobredosis. Esta tecnología, tiene la función de liberar los nutrientes a las plantas a una velocidad cercana a la demanda de nutrientes de las plantas, durante un periodo prolongado (Goertz, 1993). Agronómicamente, el uso del FLP está asociado con el mejoramiento de las condiciones de crecimiento de las plantas, la reducción del estrés y la toxicidad que resulta del exceso de abastecimiento de nutrientes en las zonas cercanas a la raíz de las plantas. Según Trenkel (1997), los FLP tienen la ventaja de reducir la toxicidad (particularmente de las semillas) que es causada por las altas concentraciones de nutrientes. Debido a la reducción de la toxicidad y al contenido de sales de los sustratos, permiten la aplicación de fertilizante en mayor cantidad en una sola aplicación, reduciendo la frecuencia de aplicación y disminuyendo las horas de trabajo. Reducen la posible pérdida de nutrientes, lo que disminuye sustancialmente el riesgo de contaminación ambiental. Contribuyen a la reducción de la emisión de gases a la atmósfera (particularmente N<sub>2</sub>O). Finalmente, aumentan la eficiencia en el uso de fertilizantes. De acuerdo con Trenkel (1997), un fertilizante puede ser descrito como de liberación lenta prolongada, si el nutriente o los nutrientes declarados como de liberación lenta satisfacen, bajo condiciones definidas, cualquiera de los siguientes tres criterios: hasta el 15% de liberación de nutrientes en 24 horas, hasta el 75% de liberación de nutrientes en 28 días y cerca del 75% de liberación de nutrientes en el tiempo de liberación indicado. De ahí que, los FLP contienen el nutriente en una forma que, después de la aplicación, demora significativamente más tiempo en estar disponible para la absorción de la planta que en un fertilizante común (FAO, 2002).

Los FLP se fabrican, comúnmente, cubriendo un fertilizante con un material (semipermeable) polimérico. Sin embargo, también pueden contener el fertilizante distribuido en todo el volumen de la matriz polimérica (Shaviv, 2001). Debido a que la liberación de los nutrientes depende de la temperatura del suelo, de la concentración y de la humedad, el nutriente será disponible de acuerdo con el crecimiento de la planta. Estos pueden ser clasificados generalmente como: compuestos orgánicos con baja solubilidad:

estos se pueden dividir de acuerdo a los compuestos de descomposición biológica; basados en productos de condensación urea-aldehído, y compuestos de descomposición química (principalmente); como isobutilideno-diurea y como fertilizantes en donde el control de liberación se debe a una barrera física: los fertilizantes aparecen como núcleos o gránulos revestidos con polímeros hidrofóbicos o como matrices donde el material activo soluble es dispersado en una matriz continua que restringe la disolución del fertilizante (Shavit, 2000).

### **Matrices para la elaboración de fertilizantes de liberación prolongada**

Los recubrimientos poliméricos han sido ampliamente usados para proporcionar protección a fármacos, enmascarar sabores y modificar la liberación de diversos agentes activos. Típicamente, los recubrimientos poliméricos deben ser diluidos o dispersados en solventes antes de recubrir los agentes activos. Se ha utilizado una gran variedad de materiales poliméricos para la preparación de fertilizantes de liberación controlada, poliolefinas (Salman, 1989), polisulfona (Tomaszewska y Jarosiewicz, 2006), vinil acetato de polietileno (Abedi-Koupai *et al.*, 2012), poliacrilato (Zhou *et al.*, 2015), derivados de celulosa (Shavit *et al.*, 1997); sin embargo, el uso de estos sistemas puede tener como consecuencia la contaminación del suelo debido a la baja o nula biodegradabilidad de estos componentes. De acuerdo con Nedovic *et al.* (2011), los materiales usados para el encapsulamiento de agentes deben ser de grado alimenticio, biodegradables y capaces de formar una barrera entre la fase interna y los alrededores. La biodegradabilidad es la capacidad que tiene un material de descomponerse en los ambientes más comunes donde el material es dispuesto dentro de los tres primeros años a través de un proceso biológico natural, en suelo carbonoso no tóxico, agua, dióxido de carbono o metano (Sempeho *et al.*, 2014).

### **Parámetros que afectan la velocidad de liberación de nutrientes**

La liberación de nutrientes a partir de los FLP es principalmente prolongada mediante el mecanismo de difusión y depende del medio en el que se encuentre. En un FLP los principales factores que influyen en la tasa de liberación son: el coeficiente de difusión, el espesor de la capa, la temperatura, la concentración de saturación de los nutrientes y el tamaño de gránulos de fertilizante

(Du *et al.*, 2005). Diferentes factores afectan la penetración de agua en la matriz, como el tipo de fertilizante (solubilidad, densidad), tipo de matriz, composición y concentración de la matriz, tamaño del dispositivo y tamaño de los poros (Shavit *et al.*, 1997). Tomaszewska (2006) demostraron que disminuir el espesor y la porosidad de la matriz encapsulante resultó en una disminución de la tasa de liberación de iones fosfato, potasio y amonio. Esto se logró utilizando un método de esprayado en varias capas para el encapsulamiento de fertilizante, utilizando polisulfona diluida en solvente como matriz encapsulante. De esta manera una menor temperatura y un mayor espesor de la capa reducen el coeficiente de difusión de la interface sobre la que tienen que difundir los nutrientes, en consecuencia, la velocidad de liberación de los nutrientes disminuye (Ali y Danafar, 2015). Se ha demostrado que la cristalinidad de los polímeros afecta la permeabilidad y las características de difusión de agentes activos (Jeong *et al.*, 2003). Los dominios cristalinos interfieren con las líneas de flujo, llevando a un incremento en la tortuosidad en el camino de difusión y actuando como un “entrecruzamiento”, restringiendo la movilidad de las cadenas alifáticas de los compuestos macromoleculares. De esta manera, el uso de matrices de polímeros con alto grado de cristalinidad, imparten una lenta difusión y liberación del fertilizante (Ali y Danafar, 2015). De acuerdo a Shavit (1997) existen tres principales procesos que controlan la liberación de nutrientes, a través del proceso de difusión, desde las matrices encapsulantes; primeramente, el agua penetra a través de los poros de la matriz formando un frente de humectación, seguidamente, el agua disuelve a los nutrientes contenidos en la matriz y por último, los nutrientes son liberados a través de los poros mediante la difusión.

### **Métodos de encapsulamiento de los compuestos del FLP**

El microencapsulamiento es un proceso en donde pequeñas partículas que contienen un agente activo son rodeadas por un recubrimiento a base de un material diferente al agente activo para formar una cápsula. Este proceso permite la protección del agente activo contra agentes externos, además de proporcionar una disminución en la tasa de liberación de estos agentes (Díaz - Gamboa *et al.*, 2011). Una gran variedad de partículas ha sido objeto de estudio en el campo del microencapsulamiento, incluyendo adhesivos, agroquímicos, sabores, enzimas

activas, fármacos, fragancias, entre otras. La mayoría de los materiales encapsulantes son polímeros orgánicos, aunque también se han utilizado grasas y ceras (Renard *et al.*, 2002). En general, el propósito del encapsulamiento es el de estabilizar un agente activo y prolongar o controlar su tasa de liberación.

El desarrollo de las tecnologías de encapsulamiento se ha incrementado en los últimos años. Existe una gran variedad de técnicas reportadas para la microencapsulación, estas pueden dividirse en dos categorías principales: En la primera, los materiales iniciales son monómeros o prepolímeros; en estos métodos están involucradas reacciones químicas a lo largo de la formación de la microcápsula. En la segunda, los materiales iniciales son polímeros, por lo que no hay una reacción química involucrada durante la formación de la microcápsula (Dubey, 2009). Las técnicas más populares usadas en el desarrollo de microencapsulados son: spray coating, coacervación, evaporación de solventes, gelación iónica, liposomas, spray drying y spray chilling (Okuro *et al.*, 2013). Generalmente el método de microencapsulamiento depende de la naturaleza del material a encapsular y del material encapsulante. Algunos de los métodos más utilizados en la microencapsulación se describen: a) Polimerización en emulsión: este método utilizado para el encapsulamiento, generalmente, involucra la emulsificación de un monómero hidrofóbico en una fase acuosa que contiene el material a ser encapsulado, donde la polimerización del monómero ocurre a través del uso de un iniciador de radicales libres o mediante la irradiación de alta energía. La polimerización en emulsión involucra la formación de grandes gotas de monómero emulsificadas con un surfactante por encima de su concentración micelar crítica en fase acuosa. La polimerización comienza con la introducción de un iniciador soluble en agua y la formación de un radical libre y la adición de las primeras unidades de monómero. Estas especies difunden a través de las micelas hinchadas de monómero. La etapa de propagación de la polimerización es sostenida mediante la absorción de las moléculas de monómero en la fase acuosa para mantener el equilibrio. La polimerización continúa hasta que todos los monómeros son consumidos y las cadenas poliméricas crecen en las micelas. Este proceso conduce a la formación de las partículas de agente a encapsular rodeadas del polímero formado por la polimerización de los monómeros (Mittal, 2013); b) Policondensación interfacial: este método involucra la formación de una

membrana polimérica alrededor de la fase que será encapsulada. La policondensación interfacial involucra a dos monómeros, particularmente reactivos cuando están juntos, los cuales reaccionan en la interface de dos fases inmiscibles, generando la formación de una membrana polimérica alrededor de la fase interna dispersa. Las microcápsulas se obtienen a partir de una emulsión agua-en-aceite o aceite-en-agua, donde cada fase contiene un monómero, y la solubilidad y el coeficiente de partición de los dos monómeros controlan la localización de la reacción. Se requieren dos pasos para la policondensación interfacial. Primero, se prepara una emulsión cuyas gotas contienen a uno de los monómeros. El agente para encapsular es disuelto o disperso en las gotas que contienen a uno de los dos monómeros y se añade un surfactante de ser necesario. La fase externa contiene un surfactante para estabilizar las gotas. Segundo, después de lograr la distribución a tamaño de gota adecuada, el segundo monómero disuelto en una pequeña cantidad de la fase externa es añadido. A través de la adición de un iniciador y debido a la funcionalidad de los monómeros, ocurre la reacción de policondensación y se origina la formación de una membrana en la interface (Benita, 2005); c) Entrecruzamiento en suspensión: la formación de las microcápsulas ocurre a través de la dispersión de una solución polimérica acuosa que contiene al agente a encapsular en un solvente orgánico inmiscible en forma de pequeñas gotas. El medio de suspensión contiene un estabilizador adecuado para mantener la individualidad de las gotas. En seguida, las gotas son entrecruzadas covalentemente y son convertidas en las correspondientes microcápsulas. El proceso de entrecruzamiento es realizado térmicamente (a una temperatura mayor a 500°C) o mediante el uso de un agente entrecruzante (Ruíz y Segura, 2017); d) Evaporación de solvente/extracción de solvente: La técnica de evaporación de solvente se basa en la evaporación de la fase interna de una emulsión en agitación. Inicialmente, el material polimérico de recubrimiento es disuelto en un solvente orgánico volátil. El agente activo para encapsular es disperso o disuelto en la solución orgánica para formar una suspensión, una emulsión o una solución. En el siguiente paso, la fase orgánica es emulsificada bajo agitación en una fase dispersora que consiste en un solvente en el cual no es soluble el polímero, la cual es inmiscible con el solvente orgánico, y que contiene una cantidad apropiada de tensoactivo. Una vez que la emulsión es estabilizada, se mantiene la agitación y el solvente es evaporado después de su difusión

a través de la fase continua. El resultado es la creación de microcápsulas sólidas. Las microesferas que se encuentran en suspensión se recuperan mediante filtración o centrifugación y son lavadas y secadas. Para el caso de la técnica de extracción de solvente, en teoría, si se utiliza una fase continua que extraerá inmediatamente el solvente de la fase dispersa, la etapa de evaporación no es necesaria para la formación de las microcápsulas. En la práctica, esto puede lograrse mediante el uso de grandes volúmenes de la fase dispersante con respecto a la fase dispersa, o utilizando una fase dispersa que consiste de co-solventes, donde por lo menos uno de ellos tiene una gran afinidad por la fase dispersante (Benita, 1996); e) Coacervación/separación de fases: en esta técnica, el microencapsulamiento se lleva a cabo preparando una solución polimérica en la cual el agente a encapsular es dispersado, y donde se requiere el uso de un estabilizador adecuado. El polímero de recubrimiento es inducido a la separación mediante la adición de un agente de desolvatación, disminuyendo la temperatura, cambiando el pH, añadiendo un segundo polímero, o cambiando otra condición ambiental. Es esencial que estos cambios ocasionen que el polímero salga de la solución y forme agregados alrededor del agente a encapsular para formar una pared continua encapsulante. La coacervación del polímero puede ser reconocida mediante la aparición de turbidez, gotas, o la separación de la solución en dos capas, que contienen una alta y baja concentración de polímero (Benita, 1996); f) Spray Drying/Spray Chilling: En Spray Drying, se prepara una emulsión dispersando al agente a encapsular, inmiscible en agua, en una solución concentrada del material encapsulante. La emulsión resultante es atomizada en forma de gotas esparcidas mediante el bombeo de la emulsión a través de un disco rotatorio a un compartimiento calentado de un secador en spray. La porción acuosa de la emulsión es evaporada, resultando en cápsulas secas del agente activo rodeadas del material encapsulante. En el caso del Spray Chilling, se atomiza la matriz en estado fundido, donde las gotas generadas se solidifican una vez que entran en contacto directo con aire frío (Dubey *et al.*, 2009); g) Recubrimiento en cama de lecho fluidizado: en esta técnica, partículas sólidas son suspendidas en un chorro de aire y cubiertas mediante el esparcido de un material líquido. Las cápsulas son transportadas a un área donde el recubrimiento solidifica mediante enfriamiento o por vaporización de solvente. El proceso de suspensión, esparcido y enfriado es repetido hasta que se logra el espesor requerido en las paredes de la microcápsula. Este

método está restringido a agentes a encapsular sólidos (Jyothi *et al.*, 2012); h) Solidificación de polímero fundido: esta técnica se basa en la acumulación de gotas pequeñas de lípido o polímero fundido en la superficie del agente activo a encapsular. Este proceso, en general, se compone de diferentes etapas: calentamiento del equipo de recubrimiento, calentamiento del agente a encapsular y fundido del agente de recubrimiento, dispersión del agente de recubrimiento en el agente a encapsular y finalmente, enfriamiento del sistema para permitir el enfriamiento de las gotas en una película uniforme de recubrimiento (Jannin y Cuppok, 2013); i) Precipitación de polímero: una solución de un polímero que contiene al agente a encapsular se agrega a un solvente en agitación, en el cual no es soluble el polímero, y que actúa como un medio de precipitación, las gotas de polímero son inmediatamente precipitadas y se obtienen las microcápsulas (Dubey *et al.*, 2009); j) Proceso de coextrusión: esta tecnología es utilizada para producir partículas tipo “coreshell”, y se basa en la extrusión, a través de una boquilla concéntrica, del agente a encapsular líquido a través de la boquilla interna y el material encapsulante a través de la boquilla externa. La formación de las micropartículas ocurre a través del enfriamiento y transición vítrea del material encapsulante (Zuidam y Nedovic, 2010); k) Disco rotatorio: en esta técnica, una suspensión de partículas de agente a encapsular en un material encapsulante líquido se coloca en un disco rotatorio y debido a la acción rotatoria del disco las partículas de agente encapsulante son recubiertas con el material encapsulante, posteriormente las microcápsulas son obtenidas a través de procesos como Spray Drying o Spray Chilling (Dubey *et al.*, 2009) y, l) Estos sistemas de microcápsulas diseñadas para los FLP son muy ventajosas en comparación con los métodos convencionales, ya que pudieran contribuir a la obtención de mayores rendimientos en los cultivos, así como a los costos de producción y la reducción de la contaminación ambiental (Ma *et al.*, 2013). En este sentido, los polímeros naturales obtenidos a base de subproductos agrícolas como: proteínas, almidón, celulosa y quitosano son apropiados para su uso como encapsulamiento, ya que son materiales 100% natural, biodegradable, de bajo costo y altamente disponible; característica necesaria para evitar la contaminación del suelo y obtener un sistema de liberación a bajo costo, centrados en mejorar la eficiencia de N en diferentes cultivos (Blomfeldt *et al.*, 2011). Actualmente se han diseñado FLP en matrices orgánicas y/o con cubiertas poliméricas

de bajo costo, como respuesta a la necesidad de fertilizantes ambientalmente amigables. El gluten de trigo es un material que se ha estudiado a profundidad y cuenta con estas características deseadas para ser utilizado como un FLP aplicable para la urea (Maltais y Subirade, 2010; Rodríguez *et al.*, 2012; Dórame *et al.*, 2018; Barreras – Urbinas *et al.*, 2018).

### **El gluten de trigo como matriz de encapsulamiento**

El gluten de trigo es un polímero 100% natural, biodegradable, de bajo costo y altamente disponible (Blomfeldt *et al.*, 2011). Se define como la masa de goma que queda cuando el trigo se lava para eliminar los gránulos de almidón y componentes solubles en agua. El término gluten se refiere a las proteínas, ya que juegan un papel clave en la determinación de la calidad de cocción única de trigo confiriendo capacidad de absorción de agua, cohesividad, la viscosidad y la elasticidad en masa (Wieser, 2007). El gluten contiene cientos de componentes de proteína de bajo y alto peso molecular, gliadinas (28,000 - 35,000 Da) y glutaminas (70,000 - 10 millones de Da), respectivamente ya sea como monómeros o unidos por enlaces disulfuro intercatenarios, como oligo y polímeros (Wieser, 2007; Scherf *et al.*, 2016). Son únicos en términos de sus composiciones de aminoácidos, que se caracterizan por un alto contenido de glutamina y prolina y por bajos contenidos de los aminoácidos con grupos laterales cargados (Zhang y Burgar, 2007).

Tradicionalmente, las proteínas del gluten se han dividido en fracciones aproximadamente iguales de acuerdo con su solubilidad en soluciones de alcohol-agua de gluten; las gliadinas solubles y las gluteninas insolubles. Ambas fracciones son importantes ya que tributan a las propiedades reológicas de la masa, pero sus funciones son divergentes. Las gliadinas hidratadas tienen poca elasticidad y son menos cohesivos que las gluteninas; que contribuyen principalmente a la viscosidad y extensibilidad del sistema de masa. En contraste, las gluteninas hidratadas son ambas cohesiva y elástica y son responsables de la fuerza de la masa y elasticidad. Por lo que, el gluten es uno de los componente pegamentosos, en el que las gliadinas pueden entenderse como un plastificante o disolvente para gluteninas (Wieser, 2007).

Las proteínas WG tiene grupos amino y carboxilo, que pueden promover las interacciones a través enlaces de hidrógeno con los grupos amino y carbonilo presentes en urea (Zhang *et al.*, 2010; Martínez-Rubalcaba *et al.*, 2009). Estos grupos funcionales demostraron variación a diferentes temperaturas y pH del suelo (Freiberg y Zhu, 2004; Maltais *et al.*, 2010). Estudios realizados en membranas WG obtenidas por electrospinning (Castro *et al.*, 2012), se evaluó el efecto del pH y la temperatura sobre la velocidad de liberación de la urea y sus mecanismos de transporte, se observó susceptibilidad en la velocidad de la liberación de la urea a pH 4 y 10, y temperaturas superiores a los 40°C, liberándose mayor cantidad de urea. Sin embargo, con pH 7 y temperaturas entre 25 y 40 °C, la velocidad de la liberación fue menor. Por otra parte, la mayoría de los investigadores sólo han evaluado, a nuestro entender, la liberación simulada de la urea en líquido (agua), donde al parecer la humedad es un efecto negativo en la velocidad de la liberación (a mayor humedad, mayor velocidad de liberación de N) Rodríguez *et al.*, 2012; Dórame *et al.*, 2018; Barreras – Urbinas *et al.*, 2018. Sin embargo, este comportamiento sería diferente en suelo, teniendo en cuenta la influencia de diferentes factores bióticos y abióticos existentes (Echevarría *et al.*, 2020).

Como se mencionó anteriormente, las características del WG hacen de este, fuente de un material para encapsular compuestos activos para las prácticas agrícolas. El uso de WG representa una reducción en el impacto ambiental, así como, apoya las industrias agrícolas y alimenticias debido al valor añadido involucrado (Freiberg y Zhu, 2004; Maltais *et al.*, 2010). Teniendo en cuenta estas características, el gluten de trigo es un polímero adaptable como una matriz para el desarrollo e implementación de un sistema de FLP de urea con posible aplicación en campos agrícolas (Castro *et al.*, 2012; Rodríguez *et al.*, 2012; Dórame *et al.*, 2018; Barreras – Urbinas *et al.*, 2018).

### **Uso del fertilizante de liberación prolongada de urea**

Diversas investigaciones han determinado el potencial de efectividad de los FLP de urea, encapsulado en una matriz de gluten de trigo (WG), caracterizada microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), termogravimetría (TGA), calorimetría diferencial

de barrido (DSC) y el estudio de urea liberar cinética. Estudios que brindan un conocimiento previo sobre la morfología, interacción y estabilidad térmica de los compuestos, así como una simulación de la liberación de la urea en agua. Castro *et al.* (2012), evaluaron membranas obtenidas a partir de una matriz de WG y obtuvieron características de pequeño espesor, con estructuras asimétricas y porosas que variaron en tamaño. También, observaron una fuerte interacción de enlace formado por los puentes de hidrógeno de los compuestos en estudio (urea y gluten), lo cual demostró que las partículas de urea estaban adheridas a las del gluten (Tapia-Hernández *et al.*, 2018), permitiendo que la urea no se libere totalmente al hacer contacto con el agua (Cherian, 1995; Irissin-Mangata, 2001). Así mismo, la estabilidad que mostraron a las altas temperaturas, permitiendo que los compuestos no se degraden fácilmente (Li y Gil, 2006; Castro *et al.*, 2012; Reddy, 2015). Recientemente, Echevarría *et al.* (2020), evaluaron un sistema de FLP de urea, obtenidos mediante diferentes métodos de secado (liofilización, túnel y estufa) y también observaron, estructuras muy porosas, de diferentes tamaños, alcanzando un promedio de 4.5 a 32  $\mu\text{m}$  de su diámetro. La presencia de estas estructuras porosas ofrece una ventaja a favor del FLP (Shi *et al.*, 2014; Hao, 2015), teniendo en cuenta que son la vía de entrada del agua y salida lentamente del producto, aumentando así la eficiencia del material liberado (urea) (Bruinink, 2015; Davidov-Pardo, 2015). En estudios de cinética de liberación en agua, se ha observado que inicialmente se produce un efecto de estallido, denominado por una marcada liberación de la urea en los primeros minutos de evaluación (Mulder, 2011), atribuido a las partículas de urea que quedaron desprendidas en el producto y/o sobre la superficie de la matriz polimérica que son las primeras en liberarse al hacer contacto con el medio acuoso, lo que resulta una rápida liberación de la urea (Bird, 2002). Posteriormente, una liberación muy lenta se produce en el transcurso del tiempo. Barreras-Urbina *et al.* (2016) en su estudio con nanopartículas y micropartículas de proteínas de trigo y gluten solubles en etanol, obtuvo una liberación del 50% de la urea durante la primera hora aproximadamente, y el equilibrio de difusión a las 12 horas, con el 88% de la liberación total de la urea. Así mismo, Castro-Enríquez *et al.* (2012), observaron, una liberación rápida de la urea (56%), durante los primeros 10 min, en membranas de WG cargadas con urea y se alcanzó el equilibrio de difusión a las 5 horas con un 98%

de urea liberada. Cabe destacar, que estos resultados son una simulación del comportamiento que puede presentar el FLP en condiciones de suelo y de cultivo. No obstante, en este último (suelo), la influencia de los diversos factores bióticos y abióticos como lo son el tipo de suelo, textura, contenido de materia orgánica, acidez, pH y humedad (irrigación), influyen en el desempeño de estos sistemas, por lo que su comportamiento puede ser de manera diferente. En este sentido, estudios realizados por (Azeem *et al.*, 2014), evaluaron un FLP de urea en cultivos de Maíz y Trigo y, observaron una liberación de la urea lenta y prolongada en todo el desarrollo de los cultivos, obteniendo resultados relevantes en los rendimientos con respecto al control evaluado. También, estudiaron combinaciones de sistemas controlados de liberación de urea y urea convencionales, con el fin de mejorar la eficiencia del N en los cultivos de maíz y descubrieron que la combinación de ambas prácticas redujo la eficiencia del FLP, sin embargo, disminuyó los costos de fertilización y el manejo para su aplicación (Azeem *et al.*, 2014). Estos estudios, abren un nuevo camino para la reducción en las aplicaciones irracionales de fertilizantes químicos nitrogenados, principalmente en las zonas áridas donde existen los mayores problemas por lixiviación, debido a la característica que presentan los suelos. Tema de gran interés, en el que se continúa profundizando, con el objetivo de obtener un método armonizado para determinar la traslocación de los nutrientes desde el FLP hacia la solución del suelo y, que tengan en cuenta la influencia de los factores existentes.

## CONCLUSIONES

El garbanzo es una fuente importante de alimento humano y animal, debido a su alto valor nutricional y, por ende, es considerada la segunda leguminosa en superficie cultivada a nivel mundial. El sector agrícola que se dedica al cultivo de garbanzo, con la finalidad de contribuir a la disminución del efecto contaminante de la atmósfera, que se produce por la emisión de gases de efecto invernadero con la liberación del dióxido de N, siendo este el principal contaminante antropogénico de la fertilización nitrogenada, demanda el uso de nuevas alternativas para evitar las pérdidas de N y lograr estrategias que permitan reducir los costos económicos, lo cual es un tema de vital importancia que se debe seguir profundizando en su investigación. Así mismo, El desarrollo de las tecnologías de encapsulamiento se ha incrementado en los últimos años. Existe una gran

variedad de técnicas reportadas para la microencapsulación. La presente revisión, presta principal interés en estudios realizados, sobre el desarrollo de sistemas de liberación prolongada y/o controlada de urea, los cuales pudieran ser utilizados en el garbanzo y otros cultivos, como una alternativa de fertilización para evitar las pérdidas de nitrógeno y, por consiguiente, las contaminaciones hacia el medio ambiente.

#### Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de los estudios de doctorado del primer autor.

**Financiamiento.** A la Universidad de Sonora, y al Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos por el apoyo brindado.

**Conflicto de interés.** Los autores declaran que no existe conflicto de intereses relacionados con esta publicación.

**Cumplimiento de estándares de ética.** Se respetó estrictamente el código de conducta mundial para la investigación en entornos de escasos recursos siguiendo el Convenio sobre la Diversidad Biológica y la Declaración de Helsinki.

**Disponibilidad de datos.** Los datos están disponibles mediante el autor de correspondencia con previa solicitud.

#### REFERENCIAS

- Abd-Alla, M. H., El-Enany, A.-W. E., Nafady, N. A., Khalaf, D. M., Morsy, F. M. 2014. Synergistic interaction of *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* and arbuscular mycorrhizal fungi as a plant growth promoting biofertilizers for faba bean (*Vicia faba* L.) in alkaline soil. *Microbiological Research*, 169(1), 49-58. DOI: 10.1016/j.micres.2013.07.007
- Acosta, G. J. A., Salinas, P. R. A., Ortega, M. P. F., Padilla, V. I., Fierros, L. G. A., Valenzuela, H. V. 2013. Programa de investigación de garbanzo en el INIFAP. Sonora, México. 132 p.
- Ahmed, S., Center, E.-W. 1994. *Agriculture-fertilizer interface in Asian and Pacific region: Issue of growth, sustainability, and vulnerability*: Food and Fertilizer Technology Center. [https://www.smart-fertilizer.com/?gclid=CjwKCAiA25v\\_B](https://www.smart-fertilizer.com/?gclid=CjwKCAiA25v_B)
- RBNEiwAZb4-ZZ0Tza13CjOKpw5UqHZeLSK1h8JFa4jzq3UC0ISfa2slMhs68XZD9RoC6IIQAvD\_BwE fecha de consulta: 20 de diciembre de 2019.
- Alexandre, A., Brígido, C., Laranjo, M., Rodrigues, S., Oliveira, S. 2009. Survey of chickpea rhizobia diversity in Portugal reveals the predominance of species distinct from *Mesorhizobium ciceri* and *Mesorhizobium mediterraneum*. *Microbial ecology*, 58(4), 930-941. DOI: 10.1007/s00248-009-9536-6
- Almasri, M. N. 2007. Nitrate contamination of groundwater: A conceptual management framework. *Environmental Impact Assessment Review*, 27(3), 220-242. DOI:10.1016/j.eiar.2006.11.002
- Anderson, N., Strader, R., Davidson, C. 2003. Airborne reduced nitrogen: ammonia emissions from agriculture and other sources. *Environment International*, 29(2-3), 277-286. DOI: 10.1016/S0160-4120(02)00186-1.
- Aouani, M., Mhamdi, R., Jebara, M., Amarger, N. 2001. Characterization of rhizobia nodulating chickpea in Tunisia. *Agronomie* 21(6-7):577-581. DOI: 10.1051/agro:2001147
- Apáez Barrios, M., Escalante Estrada, J. A. S., Rodríguez Gonzalez, M. T., Sosa Montes, E., Apáez Barrios, P. 2016. Distancia entre hileras, nitrógeno y producción de garbanzo en humedad residual. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(2), 223-234. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342016000200223](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000200223)
- Apáez Barrios, M., Escalante-Estrada, J. A. S., Rodríguez González, M. T., Apáez Barrios, P. 2017. Producción de garbanzo en función del Nitrógeno en ambientes contrastantes. [https://ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20de%20la%20Biología%20Agronomía%20y%20Economía%20T-I/HCBAE\\_TI\\_9.pdf](https://ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20de%20la%20Biología%20Agronomía%20y%20Economía%20T-I/HCBAE_TI_9.pdf). Fecha de consulta: 19 diciembre de 2019.
- Azeem, B., KuShaari, K., Man, Z. B., Basit, A., Thanh, T. H. 2014. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. *Journal of controlled release*, 181, 11-21. DOI:

- <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2014.02.020>
- Baca, B. E., Soto Urzúa, L., Pardo Ruíz, M. P. 2000. Fijación biológica de nitrógeno. *Elementos (México)* v. 7 (38) p. 43-490187-9073.  
<https://www.redalyc.org/pdf/294/29403808.pdf> Fecha de consulta: 1 de noviembre de 2019.
- Barreras-Urbina, C. G., Ramírez-Wong, B., López-Ahumada, G. A., Burruel-Ibarra, S. E., Martínez-Cruz, O., Tapia-Hernández, J. A., Rodríguez Felix, F. 2016. Nano-and micro-particles by nanoprecipitation: Possible application in the food and agricultural industries. *International journal of food properties*, 19(9), 1912-1923. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1089279>
- Barreras-Urbina, C. G., Rodríguez-Félix, F., López-Ahumada, G. A., Burruel-Ibarra, S. E., Tapia-Hernández, J. A., Castro-Enríquez, D. D., Rueda-Puente, E. O. 2018. Microparticles from wheat-gluten proteins soluble in ethanol by nanoprecipitation: preparation, characterization, and their study as a prolonged-release fertilizer. *International Journal of Polymer Science*. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/1042798>
- Benita, S. 2005. *Microencapsulation: methods and industrial applications*: Crc Press. 876 p.
- Bernabeu, P. R., Pistorio, M., Torres-Tejerizo, G., Estrada-De los Santos, P., Galar, M. L., Boiardi, J. L., Luna, M. F. 2015. Colonization and plant growth-promotion of tomato by *Burkholderia tropica*. *Scientia Horticulturae*, 191, 113-120. DOI: <http://www.sciencedirect.com/science/...>
- Biabani, A., Carpenter-Boggs, L., Coyne, C. J., Taylor, L., Smith, J. L., Higgins, S. 2011. Nitrogen fixation potential in global chickpea mini-core collection. *Biology and Fertility of Soils*, 47(6), 679-685. DOI: 10.1007/s00374-011-0574-0
- Binkley, D., Hart, S. C. 1989. The Components of Nitrogen Availability Assessments in Forest Soils. In: Stewart B.A. (eds) *Advances in Soil Science*. *Advances in Soil Science*, vol 10. Springer, New York, NY. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8847-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8847-0_2)
- Bird, R. B., Bird, D. W., Smith, E. A., Kushnick, G. C. 2002. Risk and reciprocity in Meriam food sharing. *Evolution and Human Behavior*, 23(4), 297-321. DOI: 10.1016/S1090-5138(02)00098-3
- Blomfeldt, T. O. J., Kuktaite, R., Johansson, E., Hedenqvist, M. S. 2011. Mechanical properties and network structure of wheat gluten foams. *Biomacromolecules*, 12(5), 1707-1715. DOI: 10.1021/bm200067f
- Broughton, W. J., Perret, X. 1999. Genealogy of legume-Rhizobium symbioses. *Current opinion in plant biology*, 2(4), 305-311. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(99\)80054-5](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(99)80054-5)
- Bruinink, A., Wang, J., Wick, P. 2015. Effect of particle agglomeration in nanotoxicology. *Archives of toxicology*, 89(5), 659-675. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-015-1460-6>
- Castro-Enríquez, D. D., Rodríguez-Félix, F., Ramírez-Wong, B., Torres-Chávez, P. I., Castillo-Ortega, M. M., Rodríguez-Félix, D. E., Ledesma-Osuna, A. I. 2012. Preparation, characterization and release of urea from wheat gluten electrospun membranes. *Materials*, 5(12), 2903-2916. DOI: 10.3390/ma5122903
- Celaya Michel, H. 2010. Cambios en la diversidad funcional de la vegetación en la región centro de Sonora y su efecto en la dinámica de nitrógeno y respiración del suelo. DOI: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v33n1/2395-8030-tl-33-01-00079.pdf>
- Chapin, F. S., Matson, P. A., Mooney, H. A. 2002. Terrestrial water and energy balance. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*, 71-96. <https://www.dnr.state.mn.us/whaf/about/references.html>
- Cherian, G., Gennadios, A., Weller, C. L., Chinachoti, P. 1995. Thermomechanical behavior of wheat gluten films: effect of sucrose, glycerin, and sorbitol. *Biological Systems Engineering: Papers and Publications*, 103. [https://digitalcommons.unl.edu/biosyseng\\_facpub/103](https://digitalcommons.unl.edu/biosyseng_facpub/103)

- Chibarabada, T. P., Modi, A. T., Mabhaudhi, T. 2017. Expounding the value of grain legumes in the semi-and arid tropics. *Sustainability*, 9(1), 60. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9010060>
- Cubero, J. I. 1987. Morphology of chickpea. *The chickpea*, 35-66. DOI 10.1007/978-3-319-66117-9\_3
- Dart, P. J., Islam, R., Eaglesham, A. 1975. *The root nodule symbiosis of chickpea and pigeonpea*. de Miguel Gordillo, E. 1991. *El garbanzo: una alternativa para el secano*.
- DeSa, U. N. 2013. World population prospects: the 2012 revision. *Population division of the department of economic and social affairs of the United Nations Secretariat, New York*, 18. [https://population.un.org/wpp/Publication/Files/WPP2012\\_HIGHLIGHTS.pdf](https://population.un.org/wpp/Publication/Files/WPP2012_HIGHLIGHTS.pdf) Fecha de consulta: 12 de enero de 2020.
- Dubey, R. 2009. Microencapsulation technology and applications. *Defence Science Journal*, 59(1), 82. DOI: <https://doi.org/10.14429/dsj.59.1489>
- Dudeja, S. S., C. Singh, P. 2008. High and low nodulation in relation to molecular diversity of chickpea mesorhizobia in Indian soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 54(1), 109-120. DOI: 10.1080/03650340701747005
- Dórame-Miranda, R. F., Rodríguez-Félix, D. E., López-Ahumada, G. A., Castro-Enriquez, D. D., Quiroz-Castillo, J. M., Márquez-Ríos, E., Rodríguez-Félix, F. 2018. Effect of pH and temperature on the release kinetics of urea from wheat-gluten membranes obtained by electrospinning. *Polymer Bulletin*, 75(11), 5305-5319. DOI: 10.1007/s00289-018-2327-9
- Echevarría, A. E., Wong, F. J. C., Borboa, B. F., Rodríguez, F. F., Del Toro, C. L. S., García, J. L. H. 2020. Sistema de liberación prolongada de urea en polvo con potencial uso en la agricultura sustentable. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(1): 2412. DOI: <https://doi.org/10.19136/era.a7n1.2412>
- El Hadi, E. A., Elsheikh, E. A. E. 1999. Effect of Rhizobium inoculation and nitrogen fertilization on yield and protein content of six chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars in marginal soils under irrigation. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 54(1), 57-63. [https://www.academia.edu/34314594/Effect\\_of\\_Rhizobium\\_inoculation\\_and\\_nitrogen\\_fertilization\\_on\\_yield\\_and\\_protein\\_content\\_of\\_six\\_chickpea\\_Cicer\\_arietinum\\_L\\_cultivars\\_in\\_marginal\\_soils\\_under\\_irrigation](https://www.academia.edu/34314594/Effect_of_Rhizobium_inoculation_and_nitrogen_fertilization_on_yield_and_protein_content_of_six_chickpea_Cicer_arietinum_L_cultivars_in_marginal_soils_under_irrigation) Fecha de consulta: 11 de febrero de 2020.
- El-Ghamry, A., Mosa, A. A., Alshaal, T., El-Ramady, H. 2018. Nanofertilizers vs. biofertilizers: new insights. *Environment, Biodiversity and Soil Security*, 2, 51-72. DOI: 10.21608/JENVBS.2018.3880.1029
- Elsheikh, E. A. E., Wood, M. 1990. Effect of salinity on growth, nodulation and nitrogen yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Experimental Botany*, 41(10), 1263-1269. DOI: <https://www.jstor.org/stable/23693736>
- Erman, M., Demir, S., Ocak, E., Tüfenkçi, Ş., Oğuz, F., Akköprü, A. 2011. Effects of Rhizobium, arbuscular mycorrhiza and whey applications on some properties in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under irrigated and rainfed conditions 1—Yield, yield components, nodulation and AMF colonization. *Field Crops Research*, 122(1), 14-24.
- Esfahani, M. N., Kusano, M., Nguyen, K. H., Watanabe, Y., Van Ha, C., Saito, K., Tran, L.-S. P. 2016. Adaptation of the symbiotic Mesorhizobium-chickpea relationship to phosphate deficiency relies on reprogramming of whole-plant metabolism. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(32), E4610-E4619. DOI: 10.1073/pnas.1609440113
- Espeche, C. M., Vizgarra, O. N., Mamani Gonzales, S. Y., Mendez, D. E., Ploper, L. D. 2015. El garbanzo: una buena opción para el invierno. <https://core.ac.uk/download/pdf/158831953.pdf> Fecha de consulta: 9 de diciembre de 2019.
- Fageria, N. K., Baligar, V. C. 2005. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in agronomy*, 88, 97-185. DOI: 10.1016/s0065-2113(05)88004-6
- Freiberg, S., Zhu, X. X. 2004. Polymer microspheres for controlled drug release. *International journal of pharmaceuticals*,

- 282 (1-2), 1-18. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2004.04.013
- Gaur, P. M., Tripathi, S., Gowda, C. L. L., Ranga Rao, G. V., Sharma, H. C., Pande, S., Sharma, M. 2010. Chickpea seed production manual. [http://www.icrisat.org/TropicalLegumesI/pdfs/ChickpeaManual\\_full.pdf](http://www.icrisat.org/TropicalLegumesI/pdfs/ChickpeaManual_full.pdf) Fecha de consulta: 13 de noviembre de 2019.
- Ghormade, V., Deshpande, M. V., Paknikar, K. M. 2011. Perspectives for nanobiotechnology enabled protection and nutrition of plants. *Biotechnology advances*, 29(6), 792-803. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2011.06.007
- Gil, J., Nadal, S., Luna, D., Moreno, M. T., Haro, A. D. 1996. Variability of some physico-chemical characters in Desi and Kabuli chickpea types. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 71(2), 179-184. DOI: 10.1002/(sici)1097-0010(199606)71:2<179::aid-jsfa566>3.0.co;2-7
- Goertz, H. M. 1993. Controlled release technology. *Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology*, 7, 251-274. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471238961.0107180907150518.a01>
- Graham, P. H., Vance, C. P. 2000. Nitrogen fixation in perspective: an overview of research and extension needs. *Field Crops Research*, 65(2-3), 93-106. DOI: 10.1016/S0378-4290(99)00080-5
- Gresshoff, P. M., Hayashi, S., Biswas, B., Mirzaei, S., Indrasumunar, A., Reid, D., Hastwell, A. 2015. The value of biodiversity in legume symbiotic nitrogen fixation and nodulation for biofuel and food production. *Journal of plant physiology*, 172, 128-136. DOI: 10.1016/j.jplph.2014.05.013
- Guha, T., Gopal, G., Kundu, R., Mukherjee, A. 2020. Nanocomposites for delivering agrochemicals: A comprehensive review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06982>
- Gul, R., Khan, H., Khan, N. U., Khan, F. U. 2014. Characterization of chickpea germplasm for nodulation and effect of rhizobium inoculation on nodules number and seed yield. *J Anim Plant Sci*, 24(5), 1421-1429. [https://www.researchgate.net/publication/287779009\\_Characterization\\_of\\_chickpea\\_germplasm\\_for\\_nodulation\\_and\\_effect\\_of\\_Rhizobium\\_inoculation\\_on\\_nodules\\_number\\_and\\_seed\\_yield](https://www.researchgate.net/publication/287779009_Characterization_of_chickpea_germplasm_for_nodulation_and_effect_of_Rhizobium_inoculation_on_nodules_number_and_seed_yield)
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., Nelson, W. L. 2005. *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management*. <https://www.pearson.com/us/higher-education/product/Havlin-Soil-Fertility-and-Fertilizers-An-Introduction-to-Nutrient-Management-7th-Edition/9780130278241.html>
- Immanuel, C. D., Wang, Y., Bianco, N. 2008. Feedback controllability assessment and control of particle size distribution in emulsion polymerisation. *Chemical Engineering Science*, 63(5), 1205-1216. DOI:10.1016/j.ces.2007.07.050
- Irissin-Mangata, J., Bauduin, G., Boutevin, B., Gontard, N. 2001. New plasticizers for wheat gluten films. *European polymer journal*, 37(8), 1533-1541. DOI: 10.1016/S0014-3057(01)00039-8
- Kantar, F., Elkoca, E., Ögütçü, H., Algur, Ö. 2003. Chickpea yields in relation to Rhizobium inoculation from wild chickpea at high altitudes. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 189(5), 291-297. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2003.00046.x>
- Kantar, F., Hafeez, F. Y., Shivakumar, B. G., Sundaram, S. P., Tejera, N. A., Aslam, A., Raja, P. 2007. Chickpea: Rhizobium management and nitrogen fixation. *Chickpea Breeding and Management*, 179-192. DOI : 10.1079/9781845932138.008
- Khan, N., Tariq, M., Ullah, K., Muhammad, D., Khan, I., Rahatullah, K., Ahmed, S. 2014. The effect of molybdenum and iron on nodulation, nitrogen fixation and yield of chickpea genotypes (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 7(1), 63-79. DOI:10.9790/2380-07136379
- Khurana, A. L., Dudeja, S. S. 1996. Selection of high nodulating lines of chickpea. *Crop Improvement-India-*, 23, 208-212.
- Ladizinsky, G., Adler, A. 1976. The origin of chickpea *Cicer arietinum* L. *Euphytica*, 25(1), 211-217. Lampkin, N. 2001.

- Agricultura ecológica*: Madrid, ES: Mundi-Prensa.  
DOI:10.1007/BF00041547
- Laranjo, M., Alexandre, A., Rivas, R., Velázquez, E., Young, J. P. W., Oliveira, S. 2008. Chickpea rhizobia symbiosis genes are highly conserved across multiple Mesorhizobium species. *FEMS microbiology ecology*, 66(2), 391-400. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2008.00584.x>
- Laranjo, M., Machado, J., Young, J. P. W., Oliveira, S. 2004. High diversity of chickpea Mesorhizobium species isolated in a Portuguese agricultural region. *FEMS microbiology ecology*, 48(1), 101-107. DOI: 10.1016/j.femsec.2003.12.015
- Lev-Yadun, S., Gopher, A., Abbo, S. 2000. The cradle of agriculture. *Science*, 288 (5471), 1602-1603. DOI: 10.1126/science.288.5471.1602
- Li, W., Dobraszczyk, B. J., Dias, A., Gil, A. M. 2006. Polymer conformation structure of wheat proteins and gluten subfractions revealed by ATR-FTIR. *Cereal Chemistry*, 83(4), 407-410. DOI: 10.1094/CC-83-0407
- López Reyes, M. 2001). Degradación de suelos en Sonora: el problema de la erosión en los suelos de uso ganadero. *Región y sociedad*, 13(22), 73-97. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1870-39252001000200003&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1870-39252001000200003&lng=es&nrm=iso)  
Fecha de consulta: 2 de enero de 2020.
- Ma, Z., Jia, X., Hu, J., Liu, Z., Wang, H., Zhou, F. 2013. Mussel-inspired thermosensitive polydopamine-graft-poly (N-isopropylacrylamide) coating for controlled-release fertilizer. *Journal of agricultural and food chemistry*, 61(50), 12232-12237. DOI: 10.1021/jf4038826
- Maltais, A., Remondetto, G. E., Subirade, M. 2010. Tableted soy protein cold-set hydrogels as carriers of nutraceutical substances. *Food Hydrocolloids*, 24(5), 518-524. DOI : 10.1016/j.foodhyd.2009.11.016
- Manjarrez, S. P., Gómez, G. L., Salinas, P. R. A., Armenta, S. J. L. 2004. Blanco Sinaloa-92: Caso exitoso del mejoramiento genético de garbanzo en Sinaloa. *SAGARPA-INIFAPCIRNOC. E. Valle de Culiacán. Folleto para Productores*(52), 21. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7n1/2007-0934-remexca-7-01-00209.pdf>
- Martínez-Ruvalcaba, A., Sánchez-Díaz, J. C., Becerra, F., Cruz-Barba, L. E., González-Álvarez, A. 2009. Swelling characterization and drug delivery kinetics of polyacrylamide-co-itaconic acid/chitosan hydrogels. *Express Polym Lett*, 3(1), 25-32. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.612.3427&rep=rep1&type=pdf>
- Martínez Martínez, P. 2018. Interacción sinérgica de bacterias fijadoras de nitrógeno y hongos micorrízicos arbusculares en un cultivo de haba (*Vicia faba* L.) bajo práctica de manejo convencional. URI: <http://hdl.handle.net/10317/6740>
- Martínez-Falcón, A. P., Marcos-García, M. A., Moreno, C. E., Rotheray, G. E. 2012. A critical role for Copestylum larvae (Diptera, Syrphidae) in the decomposition of cactus forests. *Journal of Arid Environments*, 78, 41-48. <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/6045/>
- Mazuela Águila, P. C. 2013. Agricultura en zonas áridas y semiáridas. *Idesia (Arica)*, 31(2), 3-4. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292013000200001>
- Medina, R., Partida, L., Palacios, R. E., Ail, C. E., Díaz, T., Velázquez, y. T. J. 2014. Primer Registro de Liriomyza sativae (Diptera: Agromizidae) como Minador de la Hoja del Garbanzo Cicer arietium. *Southwestern Entomologist*, 39(1). DOI: 10.3958/059.039.0118
- Meigs, P. 1953. World distributions of arid and semi-arid homoclimates, in Review of research on arid zone hydrology. *Arid zone program*, 1, 203-209.
- Millan, T., Clarke, H. J., Siddique, K. H. M., Buhariwalla, H. K., Gaur, P. M., Kumar, J., Winter, P. 2006. Chickpea molecular breeding: new tools and concepts. *Euphytica*, 147(1-2), 81-103. DOI: 10.1007/s10681-006-4261-4
- Mittal, V. 2013. *Encapsulation nanotechnologies*: John Wiley & Sons. 870 p.

- Montaño, N. M., Ayala, F., Bullock, S. H., Briones, O., García Oliva, F., García Sánchez, R., Tapia Torres, Y. 2016. Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 39-59. <http://dspace.cibnor.mx:8080/handle/123456789/738>
- Morales, G. J. A. 2004. G. Martínez D., J. Humberto NM, AA Fú C. 2004. *El cultivo de garbanzo blanco en Sonora*. <http://cca.uas.edu.mx/images/posgrado/Thesis/COHORTE%202013-2015/77.%20Raul%20Sauceda%20Acosta.pdf>
- Moreno, M.-T., Cubero, J. I. 1978. Variation in *Cicer arietinum* L. *Euphytica*, 27(2), 465-485. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00043173>
- Moreno, M. T., Cubero, J., Giraldez, J. V., Orive, R., Temprano Vera, F., Maroto, J. V., Santiago, C. 1983. Leguminosas de grano. *Mundi-Prensa, Madrid*. <https://vsip.info/las-leguminosas-grano-en-la-agricultura-moderna-pdf-free.html>
- Morgan, K. T., Cushman, K. E., Sato, S. 2009. Release mechanisms for slow-and controlled-release fertilizers and strategies for their use in vegetable production. *HortTechnology*, 19(1), 10-12. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.19.1.10>
- Mukerabigwi, J. F., Wang, Q., Ma, X., Liu, M., Lei, S., Wei, H., Cao, Y. 2015. Urea fertilizer coated with biodegradable polymers and diatomite for slow release and water retention. *Journal of Coatings Technology and Research*, 12(6), 1085-1094. DOI: [10.1007/s11998-015-9703-2](https://doi.org/10.1007/s11998-015-9703-2)
- Mulder, V. L., De Bruin, S., Schaepman, M. E., Mayr, T. R. 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping—A review. *Geoderma*, 162(1-2), 1-19. DOI: [10.1016/j.geoderma.2010.12.018](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.018)
- Murua, C. G., Aurre, J. M. E., Moro, M. B. G., García, A. G., Tobalina, M. P., Pereda, M. P. M., Insausti, A. A. Fertilización nitrogenada y sostenibilidad: contaminación ambiental frente a producción y calidad. *Sectoriales Sectoriales Universidad-Niversidad-Empresa Empresa*. ciudad de México. 343 p.
- Nour, S. M., Cleyet-Marel, J.-C., Normand, P., Fernandez, M. P. 1995. Genomic heterogeneity of strains nodulating chickpeas (*Cicer arietinum* L.) and description of *Rhizobium mediterraneum* sp. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 45(4), 640-648. DOI: [10.1099/00207713-45-4-640](https://doi.org/10.1099/00207713-45-4-640)
- Ortiz, A., Venialgo, M. 2017. El uso de fertilizantes químicos y el crecimiento de la agricultura paraguaya. *Contabilidad, Marketing y Empresa*, 3(1). <https://www.unae.edu.py/ojs/index.php/facem/article/view/81> Fecha de consulta: 3 de agosto de 2019.
- Perret, X., Staehelin, C., Broughton, W. J. 2000. Molecular basis of symbiotic promiscuity. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, 64(1), 180-201. DOI: [10.1128/mubr.64.1.180-201.2000](https://doi.org/10.1128/mubr.64.1.180-201.2000)
- Peterjohn, W. T., Schlesinger, W. H. 1990. Nitrogen loss from deserts in the southwestern United States. *Biogeochemistry*, 10(1), 67-79. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00000893>
- Peterjohn, W. T., Schlesinger, W. H. 1991. Factors controlling denitrification in a Chihuahuan desert ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 55(6), 1694-1701. DOI: [10.2136/sssaj1991.03615995005500060032x](https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500060032x)
- Peña-Haro, S., Llopis-Albert, C., Pulido-Velazquez, M., Pulido-Velazquez, D. 2010. Fertilizer standards for controlling groundwater nitrate pollution from agriculture: El Salobral-Los Llanos case study, Spain. *Journal of Hydrology*, 392(3-4), 174-187. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.08.006>
- Philippot, L., Germon, J. C. 2005. Contribution of bacteria to initial input and cycling of nitrogen in soils. In *Microorganisms in soils: roles in genesis and functions* (pp. 159-176): Springer. DOI: [https://doi.org/10.1007/3-540-26609-7\\_8](https://doi.org/10.1007/3-540-26609-7_8)
- Ravi, R., Harte, J. B. 2009. Milling and physicochemical properties of chickpea (*Cicer arietinum* L.) varieties. *Journal of*

- the Science of Food and Agriculture*, 89(2), 258-266. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.3435>
- Reddy, N., Shi, Z., Xu, H., Yang, Y. 2015. Development of wheat glutenin nanoparticles and their biodistribution in mice. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 103(5), 1653-1658. DOI: 10.1002/jbm.a.35302
- Renard, D., Robert, P., Lavenant, L., Melcion, D., Popineau, Y., Gueguen, J., Schmitt, C. 2002. Biopolymeric colloidal carriers for encapsulation or controlled release applications. *International journal of pharmaceutics*, 242(1-2), 163-166. DOI: 10.1016/s0378-5173(02)00143-6
- Rivas, R., Peix, A., Mateos, P. F., Trujillo, M. E., Martínez-Molina, E., Velázquez, E. 2006. Biodiversity of populations of phosphate solubilizing rhizobia that nodulates chickpea in different Spanish soils. *Plant and soil*, 287(1-2), 23-33. DOI <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9062-y>
- Rodríguez-Félix, D. E., Pérez-Martínez, C. J., Castillo-Ortega, M. M., Pérez-Tello, M., Romero-García, J., Ledezma-Pérez, A. S., Rodríguez-Félix, F. 2012. pH-and temperature-sensitive semi-interpenetrating network hydrogels composed of poly (acrylamide) and poly ( $\gamma$ -glutamic acid) as amoxicillin controlled-release system. *Polymer bulletin*, 68(1), 197-207. DOI: 10.1007/s00289-011-0549-1
- Romdhane, S. B., Tajini, F., Trabelsi, M., Aouani, M. E., Mhamdi, R. 2007. Competition for nodule formation between introduced strains of *Mesorhizobium ciceri* and the native populations of rhizobia nodulating chickpea (*Cicer arietinum*) in Tunisia. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23(9), 1195-1201. DOI:10.1007/S11274-006-9325-Z
- Romdhane, S. B., Trabelsi, M., Aouani, M. E., De Lajudie, P., Mhamdi, R. 2009. The diversity of rhizobia nodulating chickpea (*Cicer arietinum*) under water deficiency as a source of more efficient inoculants. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(12), 2568-2572. DOI: 10.1016/j.soilbio.2009.09.020
- Rupela, O. P. 1987. Nodulation and nitrogen fixation in chickpea. *The Chickpea Farnham Royal UK*, 191-206.
- Rupela, O. P. 1990. A visual rating system for nodulation of chickpea. *International Chickpea Newsletter*, 22, 22-25.
- Rupela, O. P. 1997. Field evaluation of some recently developed selections for high nodulation and value of nodulation variants of chickpea.
- Rzedowski Rotter, J. 1968. *Las principales zonas áridas de México y su vegetación*. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/2/libros/668/zonas.pdf> Fecha de consulta: 1 de noviembre de 2019.
- Salman, O. A. 1989. Polyethylene-coated urea. 1. Improved storage and handling properties. *Industrial & engineering chemistry research*, 28(5), 630-632. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie00089a021>
- Saraf, C. S., Rupela, O. P., Hegde, D. M., Yadav, R. L., Shivkumar, B. G., Bhattarai, S., Johansen, C. 1998. Biological nitrogen fixation and residual effects of winter grain legumes in rice and wheat cropping systems of the Indo-Gangetic plain. *Residual Effects of Legumes in Rice and wheat Cropping Systems of the Indo-Gangetic Plain*. Oxford and IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi, 14-30.
- Sarıgül, T., İnam, R. 2009. A direct method for the polarographic determination of herbicide triasulfuron and application to natural samples and agrochemical formulation. *Bioelectrochemistry*, 75(1), 55-60. DOI: 10.1016/j.bioelechem.2008.11.009
- Scherf, K. A., Koehler, P., Wieser, H. 2016. Gluten and wheat sensitivities—an overview. *Journal of Cereal Science*, 67, 2-11. DOI: 10.1016/j.jcs.2015.07.008
- Schlesinger, W. H., Raikes, J. A., Hartley, A. E., Cross, A. F. 1996. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems: ecological archives E077-002. *Ecology*, 77(2), 364-374. [http://www.geo.oregonstate.edu/classes/g eo541/geostatsautoregression/schlesinger\\_etal\\_ecol\\_96.pdf](http://www.geo.oregonstate.edu/classes/g eo541/geostatsautoregression/schlesinger_etal_ecol_96.pdf)
- Shaviv, A. 2001. Advances in controlled-release fertilizers. DOI: 10.1016/S0065-2113(01)71011-5

- Sheoran, A., Khurana, A. L., Dudeja, S. S. 1997. Nodulation competitiveness in the Rhizobium-chickpea nodulation variants symbiosis. *Microbiological research*, 152(4), 407-412. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0944-5013\(97\)80059-6](https://doi.org/10.1016/S0944-5013(97)80059-6)
- Shi, X., Li, C., Gao, S., Zhang, L., Han, H., Zhang, J., Li, Q. 2014. Combination of doxorubicin-based chemotherapy and polyethylenimine/p53 gene therapy for the treatment of lung cancer using porous PLGA microparticles. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 122, 498-504. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2014.07.020. Epub 2014 Jul 19.
- Siap, S. 2015. Servicio de información agroalimentaria y pesquera. *Reporte Especial Naranja*. <https://www.gob.mx/siap> Fecha de consulta: 3 de febrero de 2020.
- Siap, S. 2017. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Secretaría de Agricultura Ganadería y Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Bovino leche, población ganadera 2006–2015. <https://www.gob.mx/siap> Fecha de consulta: 3 de febrero de 2020.
- Singh, B., Sharma, D. K., Gupta, A. 2009. A study towards release dynamics of thiram fungicide from starch–alginate beads to control environmental and health hazards. *Journal of hazardous materials*, 161(1), 208-216. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.03.074
- Singh, U., Jambunathan, R. 1981. Relationship between nonprotein nitrogen and total nitrogen in chickpea (*Cicer arietinum* L.) seed. *Journal of agricultural and food chemistry*, 29(2), 423-424. DOI: 10.1021/jf00104a052
- Soren, K. R., Shanmugavadeivel, P. S., Gangwar, P., Singh, P., Das, A., Singh, N. P. 2016. Genomics-Enabled Breeding for Enhancing Micronutrients in Crops. In *Biofortification of Food Crops* (pp. 115-128): Springer. [https://scholar.google.co.in/citations?user=s60exRkAAAAJ&hl=en#d=gs\\_md\\_cita-d&u=%2Fcitations%3Fview\\_op%3Dview\\_citation%26hl%3Den%26user%3Ds60exRkAAAAJ%26citation\\_for\\_view%3Ds60exRkAAAAJ%3AUeHWp8X0CEI](https://scholar.google.co.in/citations?user=s60exRkAAAAJ&hl=en#d=gs_md_cita-d&u=%2Fcitations%3Fview_op%3Dview_citation%26hl%3Den%26user%3Ds60exRkAAAAJ%26citation_for_view%3Ds60exRkAAAAJ%3AUeHWp8X0CEI)
- C%26tzom%3D420 Fecha de consulta: 19 de marzo de 2020.
- Tapia-Hernández, J. A., Rodríguez-Félix, D. E., Plascencia-Jatomea, M., Rascón-Chu, A., López-Ahumada, G. A., Ruiz-Cruz, S., Rodríguez-Félix, F. 2018. Porous wheat gluten microparticles obtained by electrospray: Preparation and characterization. *Advances in Polymer Technology*, 37(6), 2314-2324. DOI: <https://doi.org/10.1002/adv.21907>
- Tasca, A. L., Nessi, S., Rigamonti, L. 2017. Environmental sustainability of agri-food supply chains: An LCA comparison between two alternative forms of production and distribution of endive in northern Italy. *Journal of Cleaner Production*, 140, 725-741. DOI : 10.1016/j.jclepro.2016.06.170
- Thavarajah, D., Ball, R. A., Schoenau, J. J. 2005. Nitrogen fixation, amino acid, and ureide associations in chickpea. *Crop science*, 45(6), 2497-2502. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0071>
- Thorntwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94. DOI: <https://doi.org/10.2307/210739>
- Trenkel, M. E. 1997. *Controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture* (Vol. 11): International fertilizer industry association Paris. <http://www.wnkgroup.com/Controlled-Release%20fertilizer%20in%20Agriculture.pdf> Fecha de consulta: 13 de marzo de 2020.
- Trewartha, G. T. 1954. *An introduction to climate*. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.49708134935>
- Upadhyaya, H. D., Ortiz, R., Bramel, P. J., Singh, S. 2002. Phenotypic diversity for morphological and agronomic characteristics in chickpea core collection. *Euphytica*, 123(3), 333-342. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1015088417487>
- Urquiza Rodríguez, M. N., Alemán García, C. 2011. Informe de políticas relacionadas con el Manejo Sostenible de Tierras (MST) en Cuba. In: CIGEA. **URI:** <http://repositorio.geotech.cu/jspui/h>

- andle/1234/2888 Fecha de consulta: 12 de febrero de 2020.
- Van Cauwenberghe, J., Michiels, J., Honnay, O. 2015. Effects of local environmental variables and geographical location on the genetic diversity and composition of *Rhizobium leguminosarum* nodulating *Vicia cracca* populations. *Soil Biology and Biochemistry*, 90, 71-79. DOI: 10.1016/j.soilbio.2015.08.001
- Van der Maesen, L. J. G. 1987. Origin, history and taxonomy of chickpea. In *The chickpea* (pp. 11-34). <https://edepot.wur.nl/304694> Fecha de consulta: 3 de enero de 2020.
- Van Eerd, L. L., Congreves, K. A., Hayes, A., Verhallen, A., Hooker, D. C. 2014. Long-term tillage and crop rotation effects on soil quality, organic carbon, and total nitrogen. *Canadian Journal of Soil Science*, 94(3), 303-315. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjss2013-093>
- van Spanning, R. J. M., Delgado, M. J., Richardson, D. J. 2005. The nitrogen cycle: denitrification and relationship to N<sub>2</sub> fixation. In W. Newton (Ed.), *Nitrogen Fixation 1888-2001* (pp. 277-342). Kluwer Academic Publishers. <https://research.vu.nl/en/publications/the-nitrogen-cycle-denitrification-and-relationship-to-n2-fixatio> Fecha de consulta: 4 de diciembre de 2019.
- Varshney, R. K., Close, T. J., Singh, N. K., Hoisington, D. A., Cook, D. R. 2009. Orphan legume crops enter the genomics era! *Current opinion in plant biology*, 12(2), 202-210. DOI: 10.1016/j.pbi.2008.12.004
- Varshney, R. K., Song, C., Saxena, R. K., Azam, S., Yu, S., Sharpe, A. G., Tar'an, B. 2013. Draft genome sequence of chickpea (*Cicer arietinum*) provides a resource for trait improvement. *Nature biotechnology*, 31(3), 240. DOI: <https://doi.org/10.1038/nbt.2491>
- Vavilov, N. I. 1926. Studies on the origin of cultivated plants. <https://core.tdar.org/document/125397/studies-on-the-origin-of-cultivated-plants> Fecha de consulta: 24 de noviembre de 2019.
- Veluci, R. M., Neher, D. A., Weicht, T. R. 2006. Nitrogen fixation and leaching of biological soil crust communities in mesic temperate soils. *Microbial Ecology*, 51(2), 189-196. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00248-005-0121-3>
- Vitousek, P. M., Aber, J. D., Howarth, R. W., Likens, G. E., Matson, P. A., Schindler, D. W., Tilman, D. G. 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological applications*, 7(3), 737-750. DOI: [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1997\)007\[0737:HAOTGN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[0737:HAOTGN]2.0.CO;2)
- Vázquez, R. A., Cota, L. M. L., Arce, L. C., García, R. I., Arias, B. E., Rueda-Puente, E. O. Propiedades Físicoquímicas De Suelos Cultivados Con *Asparagus Officinalis* En La Región Árida Del Noroeste De México. DOI: <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n30.p23>
- Wang, X., Gao, W., Zhang, J., Zhang, H., Li, J., He, X., Ma, H. 2010. Subunit, amino acid composition and in vitro digestibility of protein isolates from Chinese kabuli and desi chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. *Food research international*, 43(2), 567-572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.07.018>
- White, R. P., Nackoney, J. 2003. Drylands, people, and ecosystem goods and services: a web-based geospatial analysis (PDF version). *World Resources Institute* ([Available at: <http://pdf.wri.org/drylands.pdf>] Fecha de consulta: 30 de enero de 2019.
- Whitford, W. G., Duval, B. D. 2019. *Ecology of desert systems*: Academic Press.
- Wieser, H. 2007. Chemistry of gluten proteins. *Food microbiology*, 24(2), 115-119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2006.07.004>
- Wood, J. A., Knights, E. J., Choct, M. 2011. Morphology of chickpea seeds (*Cicer arietinum* L.): comparison of desi and kabuli types. *International Journal of Plant Sciences*, 172(5), 632-643. DOI: 10.1086/659456

- Wu, Y., Li, Y., Fu, X., Shen, J., Chen, D., Wang, Y., Wu, J. 2018. Effect of controlled-release fertilizer on N<sub>2</sub>O emissions and tea yield from a tea field in subtropical central China. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(25), 25580-25590. DOI: 10.1007/s11356-018-2646-2
- Yadav, O. P., Shukla, U. C. 1983. Effect of zinc on nodulation and nitrogen fixation in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *The Journal of Agricultural Science*, 101(3), 559-563. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0021859600038582>
- Yamamoto, C. F., Pereira, E. I., Mattoso, L. H. C., Matsunaka, T., Ribeiro, C. 2016. Slow release fertilizers based on urea/urea-formaldehyde polymer nanocomposites. *Chemical Engineering Journal*, 287, 390-397. DOI : 10.1016/j.cej.2015.11.023
- Yang, Y.-C., Zhang, M., Zheng, L., Cheng, D.-D., Liu, M., Geng, Y.-Q. 2011. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, yield, and quality of wheat. *Agronomy Journal*, 103(2), 479-485. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0468>
- Yanni, Y. G. 1992. Performance of chickpea, lentil and lupin nodulated with indigenous or inoculated rhizobia micropartners under nitrogen, boron, cobalt and molybdenum fertilization schedules. *world Journal of Microbiology and Biotechnology*, 8(6), 607-613. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01238798>
- Zhang, X., Do, M. D., Dean, K., Hoobin, P., Burgar, I. M. 2007. Wheat-gluten-based natural polymer nanoparticle composites. *Biomacromolecules*, 8(2), 345-353. DOI: <https://doi.org/10.1021/bm060929x>
- Zhang, X., Gozukara, Y., Sangwan, P., Gao, D., Bateman, S. 2010. Biodegradation of chemically modified wheat gluten-based natural polymer materials. *Polymer Degradation and Stability*, 95(12), 2309-2317. DOI : 10.1016/j.polyimdegradstab.2010.09.001
- Zhang, Y., Luan, S., Chen, L., Shao, M. 2011. Estimating the volatilization of ammonia from synthetic nitrogenous fertilizers used in China. *Journal of environmental management*, 92(3), 480-493. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.09.018
- Zhao, B. Q., Li, X. Y., Liu, H., Wang, B. R., Zhu, P., Huang, S. M., So, H. B. 2011. Results from long-term fertilizer experiments in China: The risk of groundwater pollution by nitrate. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 58(3-4), 177-183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.njas.2011.09.004>
- Zheng, W., Zhang, M., Liu, Z., Zhou, H., Lu, H., Zhang, W., Chen, B. 2016. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system. *Field Crops Research*, 197, 52-62. DOI: 10.1016/j.fcr.2016.08.004