



## צמחים: הכימאים המומחים של כדור הארץ

Natalia Carreno-Quintero<sup>1\*</sup>, Pablo D. Cárdenas<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>חדשנות עבור צמחים, קייג'ן נ.ו, ווגנינגן, הולנד

<sup>2</sup>היחידה לביוכימיה של הצמח, המחלקה למדעי הצמח והסביבה, אוניברסיטת קופנהגן, קופנהגן, דנמרק

### סוקרים צעירים

**GWEN**

גיל: 13



**UMBERTO**

גיל: 11



דמיינו שרגליכם היו קבורות באדמה, ושלא הייתם מסוגלים לנוע או לדבר. מה הייתם עושים כדי לאכול, לגדול ולהגן על עצמכם? הסיטואציה הזו שכיחה יותר ממה שאתם חושבים: היא חלק מחיי היומיום של צמחים. צמחים פיתחו אסטרטגיות רבות לא רק על מנת לשרוד, אלא גם לתקשר עם צמחים, חיות ומיקרואורגניזמים בסביבתם. חלק מהאסטרטגיות האלה מְעַרְבוֹת שימוש בתרכובות כימיות שמתפקדות כשליחים מהצמח לסביבתו. מדענים פיתחו שיטות יצירתיות להעריך מה וכמה מתוך כימיקל מסוים נמצא בתוך צמח. אם נוכל לזהות את המגוון הגדול של תרכובות צמחים, ייתכן שבעתיד נהיה מסוגלים להבין טוב יותר כיצד צמחים גדלים ומְתַקְשְׁרִים עם סביבתם. כמו כן אולי נוכל להשתמש בתרכובות האלה כדי לייצר תרופות ולגדל ירקות בריאים וטעימים יותר.

### צמחים מייצרים כימיקלים כדי לגדול ולתקשר עם סביבתם

מבחינה בוטנית, צמחים נחשבים כיושבים – מחוברים ישירות לגבעול, כלומר אין ביכולתם לנוע, והם מוגבלים באופן תמידי לנקודה שבה הם נובטים. כשצמחים גדלים, הם צריכים להתמודד עם סביבה שמשתנה כל הזמן – לעיתים היא יבשה מדי, פעמים אחרות רטובה

## מטבוליט (Metabolite)

תרכובת כימית שמסייעת לצמחים לגדול ולתקשר עם אורגניזמים אחרים.

## גלוקוסינולטים (Glucosinolates)

מטבוליטים מתמחים בעלי טעם חריף, שנמצאים בצמחים כמו ברוקולי, צנון וחרדל.

מדי. חשבו על השינויים בעונות, או בתנאי מזג האוויר השונים במהלך היום והלילה. כאילו שאין די בכך, צמחים צריכים גם לפתח אסטרטגיות כדי לתקשר עם שכניהם, כדי למשוך חיות שמסייעות להם להפיץ את הזרעים או האבקנים שלהם ממקום אחד לאחר, ולהגן על עצמם מפני חיות שרוצות לאכול אותם. אחת האסטרטגיות שבהן צמחים משתמשים כדי לעשות כל זאת היא לייצר מספר גדול מאוד של כימיקלים, שידועים בתור **מטבוליטים**. מטבוליטים של צמחים הם תרכובות כימיות קטנות שמסייעות לצמחים לגדול ולתקשר עם אורגניזמים אחרים.

מעריכים שבסך הכול, כל הצמחים מייצרים בין מאה אלף למיליון מטבוליטים [1]. כדי לחקור מטבוליטים, מדענים סיווגו אותם לשתי קבוצות: מטבוליטים ראשוניים ומטבוליטים מתמחים. מטבוליטים ראשוניים נמצאים בכל הצמחים ומסייעים לצמחים לגדול, להתפתח ולהתרבות. אחת מהקבוצות הכי ידועות של מטבוליטים ראשוניים היא פחמימות, אשר מספקות לצמחים אנרגיה לגדילה. מטבוליטים מתמחים הם ייחודיים לצמחים שונים, ומסייעים לצמחים לתקשר עם אורגניזמים אחרים. בהמשך המאמר נתמקד במטבוליטים מתמחים.

האם אי פעם תהיתם כיצד צמח יכול להגן על עצמו? צמחים וחרקים אוכלי עשב חיו יחד במשך מיליוני שנים, ובמהלך הזמן הארוך הזה צמחים פיתחו תרכובות הגנה רעילות. לדוגמה, כאשר חרק מתחיל לאכול את עליו של כרוב, הצמח מגדיל את כמויותיהם של מטבוליטים מתמחים שנקראים **גלוקוסינולטים**, שאז מומרים לתרכובות רעילות עוד יותר [2]. תרכובות אלה גורמות לטעמם של עלי הכרוב להיות בלתי נעים, מה שמרתיע את החרקים מלאכול אותם (איור 1A). גלוקוסינולטים מוכרים לנו מאוד, מאחר שהם נותנים לברוקולי ולצנון את מאפייני הטעם שלהם. בד בבד חרקים יצרו דרכים לסבול את התרכובות הרעילות האלה, מה שאפשר להם להמשיך לאכול את הצמחים ה"רעילים". המאבק הממושך בין צמחים לבין חרקים הוביל לאבולוציה של מיני מטבוליטים מתמחים חדשים.

במקרים אחרים, צמחים צריכים למשוך חיות כדי שיאביקו את הפרחים שלהם, כך שהצמח יוכל לייצר זרעים ולהבטיח את התרבותו (איור 1A). מאביקים לא רק חיוניים לרבייה של הצמח, אלא גם חשובים לבני אדם, מאחר ש-75% מיבולי המזון העולמי תלויים במאביקים לשם ייצור מוצלח [3]. אחת האסטרטגיות שצמחים משתמשים בה כדי למשוך מאביקים היא לייצר נוזל סוכרי שנקרא נְקֵטָר. דבורים וחרקים אחרים מבקרים צמחים במטרה לשתות את הנקטר, ובזמן שהם עושים זאת אבקנים נדבקים לגופם. כשאותו החרק או הדבורה מבקרים פרחים אחרים,

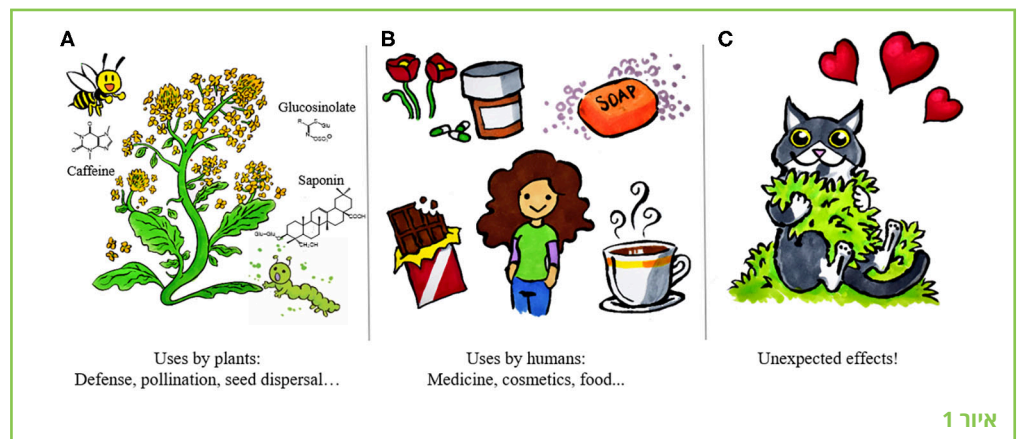
## איור 1

הבנת האופן והסיבות לכך שצמחים מייצרים מטבוליטים מתמחים עשויה לסייע לנו לפתח תרופות חדשות ומשאבים חקלאיים נוספים.

(A) צמחים משתמשים במטבוליטים מתמחים כדי להרחיק אויבים (אוכלי עשב) ולקרב חברים (מאביקים).

(B) בני אדם למדו להשתמש בצמחי מטבוליטים מתמחים לתועלתנו האישית בתרופות, בקוסמטיקה ובמזון.

(C) לעיתים, למטבוליטים מתמחים יש השפעות בלתי צפויות, כמו אלה שיש לנְפֵטָלֵקטון בצמח נפית החתול על חתולים.



איור 1

האבקנים מהצמחים הקודמים משוחררים אל הפרח החדש, מה שמבטיח ייצור זרעים עתידי. כך, צמחים משתמשים בחרקים שמבקרים אותם לטובתם האישית. עובדה מעניינת: מדענים מצאו שנקטר מכיל לא רק סוכר, אלא גם כמויות קטנות של קפאין [4]. בכמויות גדולות, קפאין הוא מר, והוא מתפקד כתרכובת הגנה של הצמח, אולם בכמויות קטנות הוא משמש כמשפר זיכרון ומגרה חרקים לזכור לחזור חזרה לעוד נקטר בעתיד, מה שמבטיח את תהליך ההאבקה של הצמח.

## בני אדם וחיות משתמשים בכימיקלים שמיוצרים על ידי צמחים

בני אדם וחלק מהחיות למדו להשתמש בכימיקלים שמיוצרים על ידי צמחים לטובתם האישית. מאז העת העתיקה, אנשים השתמשו במטבוליטים של צמחים בתור תרופות, צבעים טבעיים ומרכיבים במזון ובקוסמטיקה, בין שימושים רבים אחרים (איור 1B).

אחת מתמציות הצמחים העתיקות ביותר היא אופיום, תערובת של תרכובות כימיות שממוצות מצמח הפֶּרֶג (*Papaver somniferum*), אשר משמשת בתור נוגדן כנגד נשיכות נחשים ועכבישים, ועקיצות עקרבים. כיום, מורפיום, אחד מבין הכימיקלים הרבים שנמצאים באופיום, ניתן כתרופה להקלה על כאבים. **ספונינים** הם דוגמה מוכרת נוספת של תרכובות צמחים שמשמשות בני אדם. ספונינים נמצאים במגוון צמחים ועצים שונים, שם הם מתפקדים כתרכובות זדוניות שמרחיקות חרקים מאכילת עלי הצמח (איור 1A) [5]. נוסף על כך ילידים מרחבי העולם השתמשו באופן שכיח בתמציות צמחים עשירות בספונינים בתור סבון טבעי.

מטבוליטים של צמחים יכולים גם להשפיע על התנהגותן של חיות. נפית החתול (*Nepeta cataria*) מייצרת תרכובת שידועה בתור **נפטלקטון**. כאשר חתולים מריחים את הצמח הזה, הם נעשים שמחים ורגועים מאוד (איור 1C). נפטלקטון מקושר לרוב עם הגנה צמחית; אולם, מדענים עדיין לא מבינים לגמרי את תפקידו. מחקרים עתידיים על האופן שבו צמחים מייצרים נפטלקטונים יכולים לסייע למדענים לפתח תרופות חדשות בעלות תכונות הרדמה והרגעה, או קוטלי חרקים ביולוגיים חדשים לחקלאות.

אנו עדיין רחוקים מזיהוי כל המטבוליטים של צמחים, ורחוקים עוד יותר מהבנת האופן שבו צמחים מייצרים אותם, אך בעשורים האחרונים, פיתוחים טכנולוגיים אפשרו למדענים לגלות מטבוליטים נוספים בצמחים. בחלק הבא, נראה כיצד מדענים מבודדים ומזהים את החומרים האלה.

## כיצד מדענים מזהים כימיקלים של צמחים וחוקרים אותם?

מאחר שמטבוליטים מתמחים חשובים כל כך לצמחים ושימושיים עבורנו, מדענים פיתחו כמה דרכים למדידתם. בני אדם מיצו מטבוליטים מתמחים מצמחים במשך זמן רב מאוד. קליית קפה היא דוגמה אחת ל**מיצוי**. הרעיון הוא פשוט: חומר צמחי, לדוגמה פולי קפה טחון, מעורבב עם נוזל שנקרא **ממס** (מים חמים, במקרה של קפה) במטרה לאפשר את מיצויים של מטבוליטים. אחרי זמן מה, הממס מקבל את הטעם והצבע של המטבוליטים שנמצאים בפולי הקפה. לאחר מכן, התערובת מסוננת וחומרי הצמח הקשיחים מְנָפִים, בעוד שהנוזל הממס מכיל את מיצוי המטבוליטים של הצמח.

### ספונינים

#### (Saponins)

מטבוליטים מתמחים שבאופן מסורתי שימשו כחומר ניקוי (דטרגנט) טבעי. מקור השם במילה הלטינית "sapo" שמשמעותה סבון. תערובת ספונין חשובה מאוד, שנקראת QS-21, מגיעה מהעץ הצ'יליאני *Quillaja Saponaria*, ומשמשת בתור רכיב בחיסונים מסוימים.

### נפטלקטון

#### (Nepetalactone)

מטבוליט מתמחה שנמצא בצמח נפית החתול. מטבוליט זה משנה את ההתנהגות של חתולים, וגורם להם להיות רגועים ושמחים.

### מיצוי

#### (Extraction)

התהליך שבו מטבוליטים של צמח מופרדים ומבודדים מכל התרכובות האחרות שנמצאות בחומר הצמחי.

### ממס

#### (Solvent)

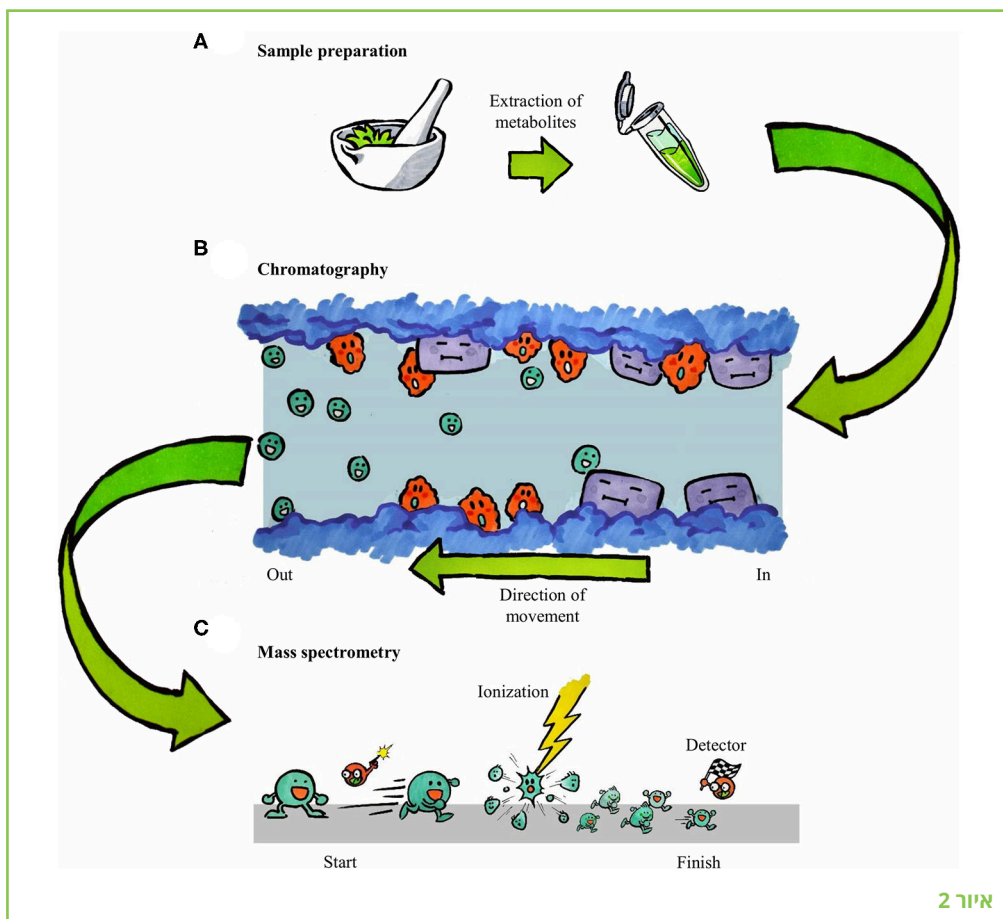
בכרומטוגרפיה, הממס הוא נוזל שבו ממוקמים המטבוליטים של הצמח. תמיסה זו של ממס ומטבוליטים מוזרמת דרך כרומטוגרפיה לצורך הפרדה.

**איור 2**

**מטבוליטים של צמחים מנותחים באמצעות כרומטוגרפיה**

**וספקטרומטריית מסה. (A) החלק הראשון של**

האנליזה הוא הכנת הדגימה. בדוגמה הזו, עלים נטחנים ומעורבבים עם ממס במבחנה. (B) באמצעות כרומטוגרפיה, החלק הנוזלי מהשלב הקודם עובר אנליזה והמטבוליטים בעלים מופרדים. (C) באמצעות ספקטרומטריית מסה, מטבוליטים של צמחים מפורקים עוד יותר (יוניזציה) וגלאי רושם את המספר והזהות של חלקי המטבוליטים שיוצאים.



איור 2

מדענים יישמו את אותו העיקרון עבור מיצוי ומחקר של מטבוליטים צמחיים רבים. במטרה לזהות מטבוליטים מסוימים, מדענים צריכים להביא בחשבון את התכונות הכימיות והפיזיקליות שלהם, כמו למשל אם המטבוליטים יכולים להימס במים, או אם נדרש ממס אחר. קבלת התמצית המסוננת היא הצעד האחרון בתהליך המיצוי (איור 2A). הצעדים הבאים הם הפרדה של התרכובות הכימיות שנמצאות בתמצית, וזיהוין.

**כרומטוגרפיה** היא שיטה שמשמשת להפרדת תרכובות כימיות (איור 2B). התערובת הנוזלית של מטבוליטים שמיועדים להפרדה נקראת "פאזה ניידת" (נמצאת במבחנה באיור 2A). לאחר מכן, הפאזה הניידת מוזרמת דרך חומר שני שנקרא "פאזה נייחת", (צבועה בכחול באיור 2B). המטבוליטים בפאזה הניידת (תמצית צמח) יתקשרו עם הפאזה הנייחת בדרכים שונות. חלק מהמטבוליטים ינועו לאט דרך הפאזה הנייחת, ואחרים ינועו מהר יותר, מה שיגרום למטבוליטים השונים להיפרד. זמני התנועה השונים של כל מטבוליט הם אחת מהחתימות שמדענים משתמשים בהן כדי לזהותם.

חלק מהמטבוליטים של צמחים ניתן לזהות בקלות באמצעות כרומטוגרפיה בלבד. אך מטבוליטים של צמחים יכולים להיות מורכבים ביותר. מורכבות זו מקשה על זיהוים, ולעיתים נדרשות שיטות אחרות לזיהוי. **ספקטרומטריית מסה** היא שיטה שמפרקת מטבוליטים עוד יותר, ואז מפרידה את החלקים השונים (שנקראים יונים) במטרה לאתר כמה מהם נמצאים בתרכובת כימית (איור 2C). ספקטרומטר מסה בנוי בדרך כלל משלושה תאים. בתא הראשון,

**כרומטוגרפיה (Chromatography)**

שיטה נפוצה להפרדת תערובת של תרכובות.

**ספקטרומטריית מסה (Mass Spectrometry)**

שיטה למדידת המסה והמטען של יונים ממולקולות שנמצאות בתמיסה.

המטבוליט מפורק לחלקיו הבסיסיים, שנקראים יונים. יונים נוהרים דרך התא השני, שנקרא "מנתח מסה", כדי להגיע לתא השלישי, שנקרא "גלאי". המסה של כל יון, והזמן שלוקח לו לעבור דרך מנתח המסה, נרשמים על ידי הגלאי, מה שמספק מידע מדויק ביותר לגבי זהותו של היון. כרומטוגרפיה וספקטרומטריית מסה יכולות להיות משולבות במכשיר חזק אחד כדי לאתר כמויות קטנות מאוד של מטבוליטים מתמחים.

## עם הפנים קדימה

הצגנו בפניכם כמה דוגמאות בלבד של המגוון העצום והשימושים הרבים של מטבוליטים של צמחים, והסברנו כיצד מדענים מבודדים ומזהים אותם. מטבוליטים רבים של צמחים כבר התגלו, ונוסף על כך שהם חשובים לצמחים שמייצרים אותם, חלק מהתרכובות שימושיות גם לבני אדם<sup>1</sup>. עדיין ישנם מטבוליטים צמחיים רבים שיש לגלות ולחקור, ובכל שנה מדענים מגלים מטבוליטים חדשים. הבנת כימיקלים של צמחים היא לא רק מרגשת, אלא גם מסייעת לנו לפתח תרופות חדשות ומשאבים חקלאיים נוספים. אף על פי שתפקודיהם של מטבוליטים צמחיים רבים עדיין אינם מובנים, תרכובות אלה מייצגות מאגר גדול של יישומים פוטנציאליים. מגוון רחב זה של תרכובות כימיות הוא שהופך צמחים להיות הכימאים המומחים של כדור הארץ שלנו.

## תודות

עבודתו של PC נתמכה על ידי תוכנית המחקר והחדשנות של האיחוד האירופי Horizon 2020 תחת מענק Marie Skłodowska-Curie מספר 752437. אנו מודים ל-Matias Aravena-Calvo על סיועו עם האיורים, ול-Javiera Aravena-Calvo על הערותיהן והצעותיהן. Marina Arias-

## מקורות

1. Halkier, B. A., and Gershenzon, J. 2006. Biology and biochemistry of glucosinolates. *Annu. Rev. Plant Biol.* 57:303–33. doi: 10.1146/annurev.arplant.57.032905.105228
2. FAO. 2018. *Why Bees Matter: The Importance of Bees and Other Pollinators for Food and Agriculture*. Available online at: <http://www.fao.org/publications/card/en/c/I9527EN/>
3. Wright, G. A., Baker, D. D., Palmer, M. J., Stabler, D., Mustard, J. A., Power, E. F., et al. 2013. Caffeine in floral nectar enhances a pollinator's memory of reward. *Science*. 339:1202–4. doi: 10.1126/science.1228806
4. Cárdenas, P. D., Almeida, A., and Bak, S. 2019. Evolution of structural diversity of triterpenoids. *Front. Plant Sci.* 10:1523. doi: 10.3389/fpls.2019.01523
5. Fang, C., Fernie, A. R., and Luo, J. 2019. Exploring the diversity of plant metabolism. *Trends Plant Sci.* 24:83–98. doi: 10.1016/j.tplants.2018.09.006

פורסם אונליין: 29 בספטמבר 2022

נערך על ידי: Antonio Olita

<sup>1</sup>אם מטבוליטים של צמחים מעניינים אתכם, קראו על התרופות טקסול וארְטמיסינין ועל הפיגמנט betalains.



מנחים מדעיים: Elisa García-López and M. Nils Peterson

**ציטוט:** Carreno-Quintero N and Cárdenas PD (2022) צמחים: הכימאים המומחים של כדור הארץ. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2020.512423-he

**תורגם והותאם:** Carreno-Quintero N and Cárdenas PD (2021) Plants: The Master Chemists of Our Planet. Front. Young Minds 8:512423. doi: 10.3389/frym.2020.512423

**הצהרת ניגוד אינטרסים:** NC-Q מועסקת על ידי קייג'ן נ.ו.

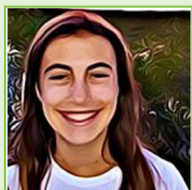
המחבר הנותר מצהיר כי המחקר נערך בהיעדר כל קשר מסחרי או כלכלי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

**COPYRIGHT** © 2021 © Carreno-Quintero and Cárdenas 2022. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (ים) המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

## סוקרים צעירים

### גיל: 13, GWEN

היי, קוראים לי ג'ון, אני גרה בארצות הברית, מנגנת בפסנתר ומשחקת כדורעף. בדיוק סיימתי את כיתה ז', והמקצועות האהובים עליי הם מדע, מתמטיקה, אומנות וספרדית. אני אוהבת לקרוא, במיוחד נובלות וסדרות של מדע בדיוני (אני אוהדת נלהבת של הארי פוטר). מתרגשת מאוד לעבוד עם פרונטייר - מדע לצעירים!



### גיל: 11, UMBERTO

קוראים לי אומברטו ואני אוהב ללמוד מדע ולשחק בנינטנדו סוויץ' עם חבריי. אני אוהב ללכת לחוף ולשחק בחול, וגם הרפתקאות ולצייר קריקטורות. בעתיד ארצה להיות פיזיקאי.



## הכותבים

### NATALIA CARRENO-QUINTERO

התשוקה שלי לצמחים ולכימיה שלהם התחילה כשהייתי סטודנטית לביולוגיה בקולומביה. בסיום התואר הראשון שלי, החלטתי למקד את הקריירה המדעית שלי בהבנת האופן שבו צמחים מווסתים את ייצורם של מטבוליטים ראשוניים ומתמחים. לקחתי חלק בפרויקטים מדעיים שעוררו אצלי עניין לא רק לגבי הבנת חילוף חומרים של צמחים והפיזיולוגיה שלהם, אלא גם לגבי האופן שבו אנו יכולים להגדיל את הפרודוקטיביות שלהם ואת השימוש בהם. אני משוכנעת שאנו יכולים ללמוד דברים רבים מצמחים, ונהנית מאוד לעסוק בתחום. כיום אני עובדת בקייג'ן, חברת ביטכנולוגיה חקלאית שממוקמת בהולנד. \*natacarre@gmail.com





## PABLO D. CÁRDENAS

אני מרותק על ידי צמחים ויכולתם לייצר כל כך הרבה תרכובות כימיות. במטרה להבין טוב יותר כיצד ומדוע צמחים נעשו כימאים מומחים, אני חוקר את הגנים של צמחים באמצעות ביולוגיה מולקולרית, ואת התרכובות הכימיות שלהם באמצעות מִטְבּוֹלוֹמִיקָה. חקרתי את הסינתזה הביולוגית של תרכובות מרות שנקראות אלקלואידים סטרואידיים בצמחי תפוח אדמה ועגבנייה, וכעת אני חוקר תרכובות הגנה צמחית דמויות סבון שנקראות ספונינים. ככל שנבין עוד על האופן והדרך שבהם צמחים מייצרים תרכובות כימיות, כך יהיה קל יותר לפתח מוצרים שימושיים עבור חברה בת-קיימא. \*pdcardenas@plen.ku.dk

מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים  
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس  
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל  
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK