

## לחיידיקים יש כוחות-על במחזור חומרי מזון באדמה

Yunuen Tapia-Torres\*, Alberto Morón-Cruz

בית הספר הלאומי ללימודים מתקדמים באוניברסיטת מורליה, האוניברסיטה הלאומית האוטונומית של מקסיקו, מורליה, מקסיקו

### סוקרים צעירים

ALAN

גיל: 13



DIEGO

גיל: 14



MANU

גיל: 14



### ביו-מולקולה (Biomolecule)

מולקולות שבונות את כל היצורים החיים כולל חלבונים, פחמימות, חומצות גרעין ופוספוליפידים.

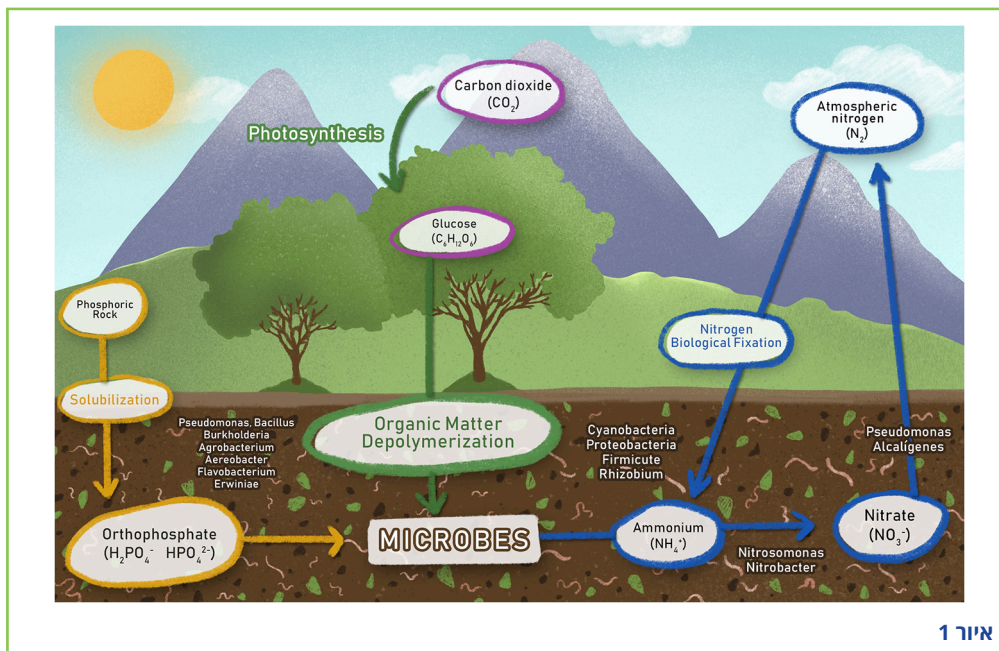
חיידיקים נמצאים בכל מקום, והם לא רק גורמים למחלות! חיידיקים מעורבים גם בהרבה תהליכים חשובים מאוד עבור חיינו על כדור הארץ. הרבה מהתהליכים האלה קשורים במחזור (שימוש מחדש) של אלמנטים כימיים שהיו כאן מאז היווצרות הפלנטה. חיידיקים משחקים תפקיד חשוב בתנועה של אלמנטים כימיים בין האוויר, המים, האדמה ויצורים חיים, מה שמאפשר את התפתחות החיים כפי שאנו מכירים אותם. כיצד חיידיקים ממחזרים אלמנטים כימיים כך שנוכל להשתמש בהם? באמצעות כוחות-על חשובים שמקודדים על-ידי הגנים שלהם!

### הכימיה של החיים

כל היצורים החיים שאנו מכירים כיום בנויים מביו-מולקולות (חלבונים, פחמימות, חומצות גרעין ופוספוליפידים) שמורכבות מקבוצות של אלמנטים כימיים חשובים. בהיווצרות של ביו-מולקולות, חלק מהאלמנטים הכימיים נדרשים בכמויות גדולות; הם ידועים כמקרו-אלמנטים. המקרו-אלמנטים הם פחמן (C), מימן (H), חמצן (O), חנקן (N), זרחן (P) וגופרית (S), שלעיתים מקצרים ל-CHONPS. ששת האלמנטים האלה הם המרכיבים העיקריים של התאים שלנו, ומייצרים 95% מהביומסה הכוללת (כל החומר שמוכל ביצורים חיים) על כדור הארץ. כל האלמנטים שנמצאים באופן טבעי על כדור הארץ הם עתיקים מאוד;

**איור 1**

תנועתן של מולקולות חשובות שמכילות פחמן, חנקן וזרחן דרך המערכת האקולוגית. התיבות מייצרות מאגרים של חומרי מזון (עם שם התרכובות והנוסחאות הכימיות שלהן), והיציבים מייצגים תהליכים שמוטיהם של חלק מהחיידקים שמבצעים תהליכים שונים מצינים מתחת לחיצים.



איור 1

**חלבונים**

**(Proteins)**

אבני הבניין של כל תא ביצורים חיים. חלבונים הם קריטיים לקיום תגובות כימיות של חילוף חומרים, והם גם מספקים לתאים את המבנה שלהם.

**מקרו-אלמנט**

**(Macroelement)**

אלמנט כימי שדרוש בכמויות גדולות לקיומם של תהליכים פיזיולוגיים נורמליים באורגניזמים חיים.

**גן**

**(Gene)**

פיסת דנ"א שמקודדת את ההוראות ליצירה של חלבון.

**קיבוע ביולוגי של חנקן**

**(Biological nitrogen fixation)**

תהליך שבו גז חנקן (N<sub>2</sub>) משולב בביומסה של אורגניזמים חיים ומומר לחנקן אורגני.

הם בערך באותו הגיל כמו כדור הארץ עצמו (4.5 מיליון שנים). האם אתם יכולים לדמיין את זה? אותם אטומי ה-CHONPS שהיו חלק ממולקולות שונות של הרבה יצורים חיים על כדור הארץ שוב ושוב, דרך תהליך ביולוגי של מחזור. משמעות הדבר היא שכל האטומים שמרכיבים את הגוף שלנו הם אותם אטומים שיכלו להיות חלק מהדינוזאורים לפני מיליוני שנים! זה מדהים!

אטומים של מקרו-אלמנטים יכולים לחבור יחד וליצור מולקולות שונות. חמצן יכול להצטרף למימן וליצור מים (H<sub>2</sub>O) או שהוא יכול להצטרף לפחמן וליצור פחמן דו-חמצני (CO<sub>2</sub>). על כדור הארץ, כמויות גדולות של מקרו-מולקולות נמצאות באטמוספירה כגזים. אולי שמעתם על פחמן דו-חמצני, מולקולת חמצן (O<sub>2</sub>) ומולקולת חנקן (N<sub>2</sub>) לדוגמה. אלה דוגמאות למולקולות גזיות שמכילות מקרו-אלמנטים. בניגוד לכך, אלמנטים כמו למשל חנקן, יכולים ליצור מולקולות שונות באוויר, במים ובאדמה. אולם מקרו-מולקולות אחרות, כמו למשל זרחן, לא קיימות כגזים, אך אנו מוצאים אותן באדמה ובמים (איור 1).

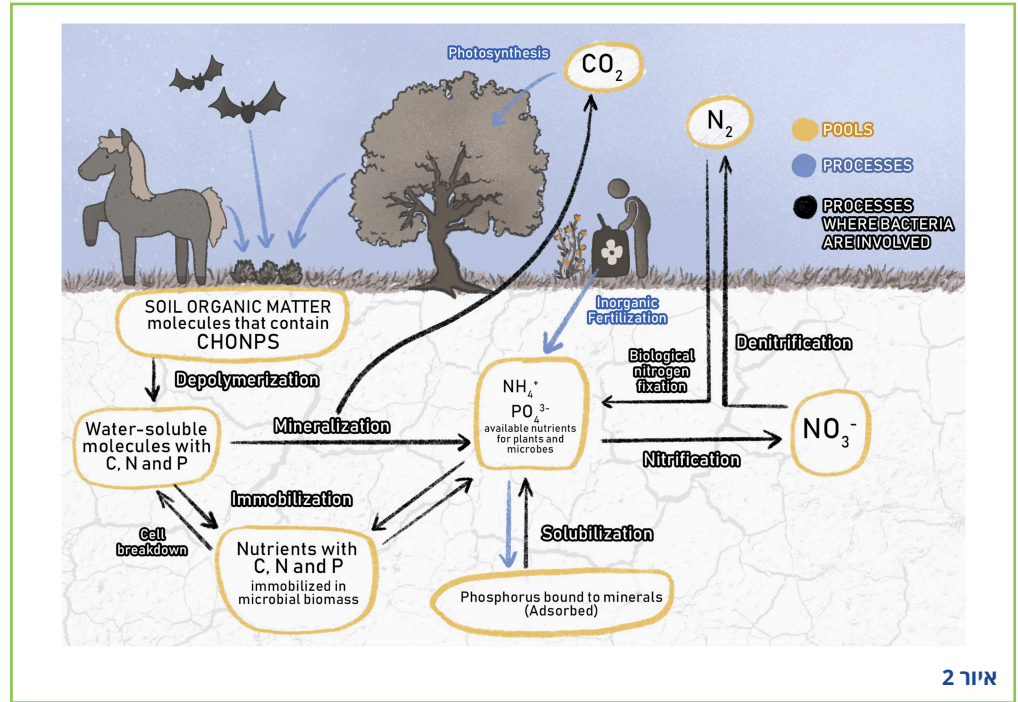
**כיצד אלמנט יכול לנוע במערכת האקולוגית?**

התנועה של מקרו-אלמנטים (CHONPS) בתוך האדמה, המים והאטמוספירה תלויה מאוד בפעילות של אורגניזמים מיקרוסקופיים: המיקרובים. "מיקרוב" מתייחס ליצור חי קטן שאי אפשר לראות בעין בלתי מזוינת, והמונח הזה משמש לתיאור של כמה צורות חיים שונות מאוד (חיידקים, פטריות, ארכאונים, וירוסים ופרוטיסטים).

חיידקים אחראיים למחזור ולהתמרה של אלמנטים על כדור הארץ, והם מבצעים את המטלה הזו הודות לכוחות-העל שמקודדים ב**גנים** שלהם. גנים הם ההוראות ליצירת המולקולות שאנו צריכים לתהליכים שונים, כולל מחזור של מקרו-אלמנטים. לדוגמה, דרך תהליך שנקרא **קיבוע ביולוגי של חנקן** (איור 1), חיידקים יכולים להשתמש בחנקן בצורה גזית (N<sub>2</sub>) כדי לייצר חלבונים, שהם מולקולות אורגניות מוצקות עשירות בפחמן ובחנקן. זה יוצא דופן: חיידקים

**איור 2**

דרכים שונות שבהן CHONPS נעים בין האוויר, יצורים חיים והאדמה. צמחים וחיות יוצרים חומר אדמה אורגני עשיר ב-CHONPS, כלומר הפרשות של חיות וצמחים שנופלים מעצים. חיידקי אדמה מבצעים מחזור של חומר אדמה אורגני דרך תהליכים שונים, וכתוצאה מכך הם מייצרים ומשחררים לאדמה מולקולות אנאורגניות ( $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$ ) שיכולות להיכרך על-ידי צמחים ומיקרואורגניזמים לשם גדילה וביצוע התפקודים שלהם. ללא נוכחות של מיקרואורגניזמים באדמה, אי אפשר להשתמש מחדש ב-CHONPS שנמצאים בחומר אורגני של האדמה, ומערכות אקולוגיות לא יכולות לתפקד יותר. התיבות מייצגות את מאגר חומרי המזון, היציבים שחורים מייצגים תהליכי מיקרוביים, ויציבים כחולים מייצגים תהליכים שבהם מיקרובים לא משתתפים.



איור 2

הם האורגניזמים החיים היחידים שיכולים להמיר, דרך תגובות כימיות שנשלטות על-ידי הגנים, חנקן גזי לחלבונים שמסייעים להם לגדול ולשמר את חייהם! בני אדם אינם יכולים להשתמש בחנקן גזי באופן שבו חיידקים משתמשים בו, אולם הודות לחיידקים האלה אנו יכולים גם לקבל חלבונים (ולכן חנקן) אל הגוף שלנו. לכן, האלמנטים הכימיים יכולים לעבור מהימצאותם באטמוספירה למצב מומס במים שנמצאים באדמה, או מהימצאותם בצורת גז להימצאותם בתוך אורגניזם חי (1, 2 איורים). כל ההתמרות האלה מתרחשות הודות לפעילות חיידקית.

חלק מהתהליכים שמשמשים למחזור ולהתמרה של מקרו-אלמנטים שיוצרים ביו-מולקולות, מוצגים באיור 2. כל חץ מורה על תהליך שנשלט על-ידי מינים שונים של חיידקים באדמה, וכל תיבה מייצגת מאגר של חומרי מזון עבור חיידקי אדמה ומיקרובים אחרים באדמה.

כדי להבין את איור 2, חשבו על עלים שנופלים מעצים ביער. העלים האלה נצברים באדמה ויוצרים שכבה של חומר אורגני (שילוב של ביו-מולקולות). החומר האורגני מורכב מסוגים שונים של פסולת מצמחים ומחיות, ומכיל מולקולות גדולות מאוד עם CHONPS בתוכן. המולקולות הגדולות האלה קשות לשימוש עבור צמחים, מאחר שהן כל כך גדולות. לכן, מיקרובים באדמה מפרקים את המולקולות האורגניות לפיסות קטנות. התהליך של פירוק מולקולות ביולוגיות מְכַנָּה **דֶּה-פּוֹלִימֵרִיזַצְיָה**, והוא מוביל לקבוצה של מולקולות קטנות שניתנות להמסה במים, כמו למשל גלוקוז (איור 2). התרכובות המומסות האלה חשובות מאוד למיקרובים באדמה שצורכים אותן, מאחר שהן מהוות את מקור הפחמן של מיקרובים.

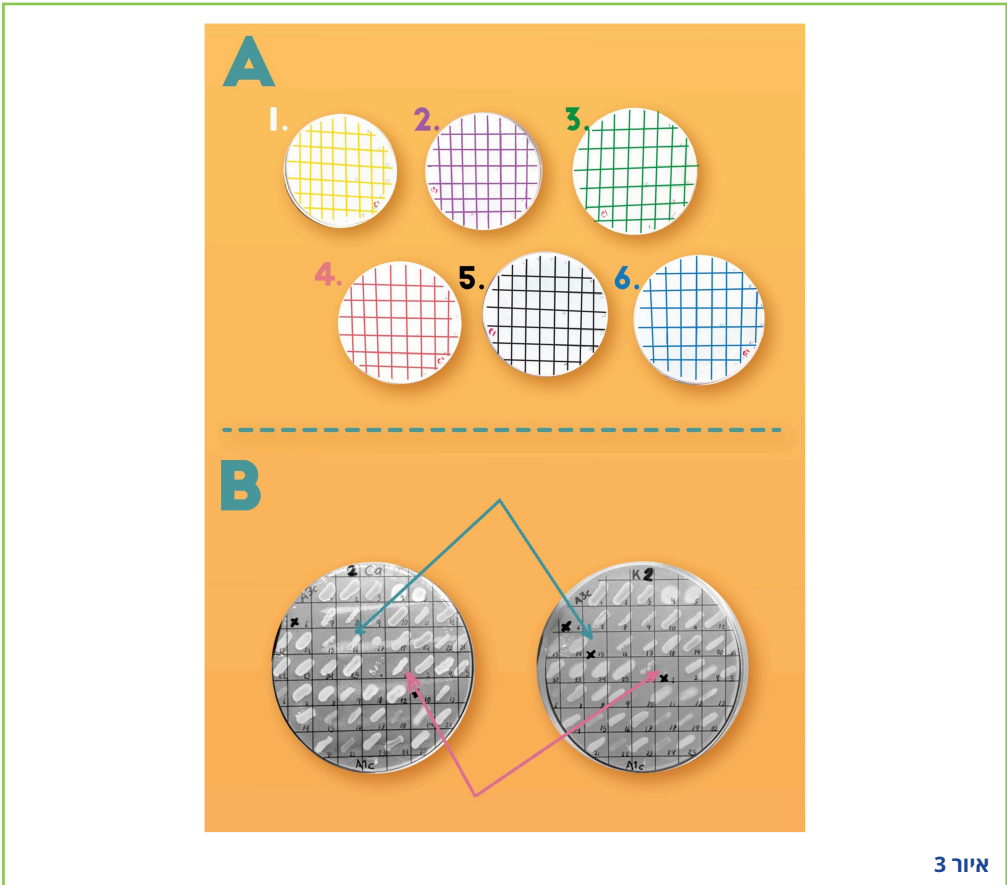
**איך חיידקים מתמרים אלמנטים שנמצאים רק באדמה ובמים?**

לזרחה אין צורה גזית יציבה. לכן, איננו יכולים למצוא אותו באטמוספירה; במקום זאת, אנו יכולים למצוא זרחן בסלעים בקליפה של כדור הארץ. זרחן הכרחי לכל היצורים החיים מאחר שהוא נמצא בביו-מולקולות רבות, כולל דנ"א. זרחן משמש גם כדשן בייצור מזון. אולם... כיצד

**דֶּה-פּוֹלִימֵרִיזַצְיָה (Depolymerization)**  
תהליך של המרת מולקולה גדולה (פולימר) למולקולות קטנות יותר (מונומר) או תערובת של מולקולות קטנות.

**איור 3**

(A) בניסוי שלנו, מקורות זרחן שונים היו נוכחים בכל צלחת פֶּטְרִי, כדי לבחון את יכולתם של סוגי חיידקים שונים להשתמש בזרחן שמוכל בכל מקור. בכל צלחת פטרי, חיידקים מאותו הסוג היו ממוקמים באותה נקודה בצלחת. (B) דוגמה לגדילה של אותו חיידק עם שני מקורות זרחן שונים. צלחת הפטרי משמאל הכילה סידן זרחתי, והצלחת מימין הכילה אשלגן זרחתי כמקור לזרחן. החיצים מראים שהחיידקים יכלו לגדול באמצעות מקור זרחן אחד בלבד. משמעות הדבר היא שכדי להיות מסוגלים להשתמש בפחמן בכל אחת מהמולקולות האלה, חיידקים צריכים גנים שונים כדי לקיים את התהליכים השונים.



איור 3

אורגניזמים חיים מקבלים זרחן אם הם לא אוכלים סלעים? חיידקים אחראיים קודם כל למחזור של זרחן בטבע, והם שולטים על מאגר הזרחן הזמין (בצורה של פוספט; -PO43) דרך מגוון של תהליכי התמרה של זרחן (הגברת המסיסות של זרחן, דה-פוליריזציה של חומרים ביולוגיים, מינרליזציה של זרחן, והטמעה של זרחן; איור 2). לאחר מכן, צמחים מקבלים זרחן מהאדמה, אוכלי עשב מקבלים אותו כשהם אוכלים צמחים, ואוכלי בשר מקבלים אותו כשהם אוכלים אוכלי עשב. באופן הזה חיות יכולות להשתמש בזרחן שבמקור נמצא בסלעים כדי לבנות את הגוף שלהן.

**מינרליזציה (Mineralization)**

תהליך ביולוגי שבו מולקולות אורגניות מומרות למולקולות אנאורגניות.

**אימוביליזציה (Immobilization)**

תהליך שמתבצע על-ידי מיקרואורגניזמים וצמחים שבו הם משלבים מולקולות אנאורגניות לתוך הביומסה שלהם, וממירים אותן למולקולות אורגניות.

אנו מכירים 200 סוגים שונים של מולקולות שמכילות זרחן, וכל אחת מהמולקולות האלה יכולה לשמש כמזון לקבוצת חיידקים אחרת. האם כל החיידקים יכולים להשתמש בכל המולקולות השונות שמכילות זרחן? כדי לענות על השאלה הזו ערכנו ניסוי. בודדנו 1,163 סוגי חיידקים מהאדמה ומהמשקעים של מערכת אקולוגית עם מעט זרחן זמין. הערכנו את החיידקים האלה עבור יכולתם להשתמש בזרחן שנמצא בשש מולקולות שונות שמכילות זרחן (איור 3). כדי להיות מסוגלים להשתמש ולבצע קיבוע (אימוביליזציה) של זרחן שנמצא בכל אחת מהמולקולות האלה, חיידקים צריכים גנים שונים כדי לבצע את התהליכים השונים (איור 2).

כדי להבין את הניסוי הזה, דמיינו חיידק אדמה רעב לזרחן בכל צלחת פטרי באיור 3A. כל צלחות הפטרי מכילות את חומרי המזון האחרים שחיידקים צריכים כדי לגדול, אולם הזרחן סופק כמולקולה שונה בכל מקרה. משמעות הדבר היא שכדי להצליח לגדול בצלחת פטרי מסוימת, החיידקים צריכים להיות בעלי הגנים המתאימים שמסייעים להם להשתמש במקור



הזרחן המסוים הזה שהוסף לצלחת. אם תסתכלו על איור 3B אתם תראו שתי צלחות פטרי עם מקורות זרחן שונים. אותם החיידקים הוצבו בשתי צלחות הפטרי. חלק מהחיידקים יכלו לגדול בשתי צלחות הפטרי, אולם בחלק מהמקרים חיידקים יכלו לגדול רק בצלחת אחת, מה שאומר לנו שסוג מסוים של חיידקים לא היה מסוגל להשתמש בשתי צורות הזרחן. בחנו כל אחד מ-1,163 החיידקים המבודדים באמצעות שש מולקולות שונות שמכילות זרחן.

## מה למדנו מהחיידקים הרעבים לזרחן האלה?

סלעים שמכילים זרחן אינם מפולגים באופן זהה בין מערכות אקולוגיות. לכן, במערכות אקולוגיות מוגבלות מאוד בזרחן, כמו המערכת האקולוגית שממנה החיידקים האלה בודדו, חיידקים יכולים לפרק זרחן ולהשתמש בצורות שונות שלו כדי לתרום למחזור הזרחן הכללי במערכת האקולוגית. במערכות האקולוגיות המוגבלות בזרחן האלה, נמצא שחיידקי אדמה משתמשים באסטרטגיות שונות רבות לשימוש בזרחן. זה אדיר: ככל שפחות זרחן זמין לחיידקים, כך הם רוכשים יותר כוחות כדי להשיג אותו.

כפי שאנו יכולים לראות, לחיידקים יש הרבה כוחות-על כשזה נוגע למחזור של אלמנטים כימיים. החיידקים האלה יכולים לאפשר את קיומם של צמחים וחיות. תהליכי המחזור האלה פועלים במשך מיליארדי שנים, והם היוו חלק משמעותי באבולוציה של יצורים חיים על פני כדור הארץ.

## תרומת הכותבים

YT-T הגתה את המחקר. כל המחברים תרמו לכל היבטי ההכנה והכתיבה של המאמר. כל המחברים אישרו את הגרסה הסופית.

## תודות

המחברים רוצים להודות לתמיכה של המענקים PAPIIT-DGAPA-UNAM (IA206219) ו-UNAM-DGAPAPAPIIME (PE207418), ולהודות לפרנדה הרננדס על סיועה עם האילוסטרציה הדיגיטלית.

## מאמר המקור

Tapia-Torres, Y., Rodríguez-Torres, M. D., Elser, J. J., Islas, A., Souza, V., García-Oliva, F., et al. 2016. How to live with phosphorus scarcity in soil and sediment: lessons from bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 82:4652–62. doi: 10.1128/AEM.00160-16

פורסם אונליין: 09 בנובמבר 2021

נערך על ידי: Angelica Cibrian-Jaramillo, Center for Research and Advanced Studies (CINVESTAV), Mexico

Front. Young Minds. . (2021) Tapia-Torres Y and Morón-Cruz A **ציטוט:** doi: 10.3389/frym.2019.00116-he

Tapia-Torres Y and Morón-Cruz A (2019) Bacteria Have Superpowers to **תורגם והותאם:** Recycle Soil Nutrients. Front. Young Minds 7:116. doi: 10.3389/frym.2019.00116

**הצהרת ניגוד אינטרסים:** המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

**COPYRIGHT** © 2019 © 2021 Tapia-Torres and Morón-Cruz. 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

### ALAN, גיל: 13

כיום אני תלמיד בכיתה השנייה של התיכון. אני חד-אבחנה מאוד, יש לי זיכרון טוב, ואני מתעניין בטכנולוגיה ובמשחקי וידאו. אני גם מתעניין בחיות ימיות ובעולם החיידקים. אני רוצה ללמוד רפואה מאחר שאני נלהב מאופן התפקוד של גוף האדם ואני רוצה לסייע לאחרים.



### DIEGO, גיל: 14

קוראים לי Diego, אבל כולם קוראים לי "Morilli". אני בן 14 ואני לומד בבית ספר "פסגות העצמאות". אני אוהב לשחק במשחקי וידאו וללכת ברגל. המאכלים האהובים עליי הם טאקו, כנפי עוף ופיצה.



### MANU, גיל: 14

שמי Manueka, אבל כולם קוראים לי Manu, ואני בשנה השנייה של בית הספר התיכון. אני אוהבת רכיבה על סוסים ואומנות. כשאגדל אני רוצה להיות ביולוגית ימית או לחקור גסטרונומיה.



## הכותבים

### YUNUEN TAPIA-TORRES

Yunuen Tapia-Torres היא מדענית של האדמה שאוהבת את המורכבות של עולם החיידקים. המחקר שלה בבית הספר הלאומי ללימודים מתקדמים, מורליה, באוניברסיטה הלאומית האוטונומית של מקסיקו, מתמקד בהבנת חשיבותם של חיידקים להתמרה של מולקולות המכילות פחמן, חנקן וזרחן באדמה. היא עובדת על חיזוק המחקר בתחום של ביוכימיה של האדמה במקסיקו, למען הבטחת אדמה פורייה בעתיד.

\*ytapia@enesmorelia.unam.mx





### ALBERTO MORÓN-CRUZ

Alberto Moron הוא מהנדס ביוכימיה ותלמיד לתואר שני במדעי הקיימות באוניברסיטה הלאומית האוטונומית של מקסיקו. הוא מתעניין בחקר תהליכים שמובילים לשימוש יעיל בזרחן; אלמנט שמזוהה כמשאב לא מתחדש וחשוב עבור תוצרת חקלאית, אשר משמש באופן בלתי יעיל ובלתי רציונלי בשדות חקלאיים במקסיקו. נוכח הבעיה הזו, המטרה של Moron היא להעריך את הקיימות של שימוש בזרחן באדמה כדי לקבל ערכי יעילות ותפוקות כלכליות. [jamoron@cieco.unam.mx](mailto:jamoron@cieco.unam.mx)

Hebrew version  
provided by

מזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים (ער.)  
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس  
Bloomfield Science Museum Jerusalem

